

Estudo da viabilidade económica da geotermia como solução energética para climatização e aquecimento de águas sanitárias em Portugal

Davide da Rocha Torres

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof^ª. Maria Dulce Soares Lopes

Orientador na Empresa: Eng.º Gustavo Ribeiro



Mestrado Integrado em Engenharia e Gestão Industrial

2017-07-17

Aos meus pais e irmão...

Resumo

A presente tese, realizada na Tecnilima, enquadra-se no âmbito da exploração do potencial da geotermia superficial como solução energética no mercado português.

O mercado do aproveitamento da geotermia superficial em Portugal, ao contrário de alguns países europeus, está pouco desenvolvido. O aproveitamento desta energia pode satisfazer as necessidades energéticas dos edifícios em Portugal, nomeadamente a climatização e produção de águas quentes sanitárias (AQS). O desenvolvimento deste mercado está dependente de inúmeros fatores. Torna-se então essencial o levantamento das razões que estão a impedir o seu desenvolvimento e fazer o estudo de mercados mais desenvolvidos, para perceber que medidas podem ser replicadas. Neste processo é também inevitável o entendimento da tecnologia, do seu funcionamento, das suas vantagens face às alternativas e o enquadramento no panorama energético geral, de modo a permitir que a empresa se posicione e elabore uma proposta de valor adequada.

O potencial do aproveitamento desta energia, que está em baixo dos nossos pés, é desconhecido por grande parte do público português. O presente trabalho pretende dar a conhecer uma alternativa renovável, que é a geotermia superficial, apresentando não só a sua validade técnica como a sua viabilidade financeira através da exposição e análise de dois casos de estudo. Perceber o conceito de funcionamento, bem como as vantagens em termos ambientais e as poupanças financeiras, permitirá uma maior consciencialização da tecnologia e possível disseminação em Portugal, como ocorre em outros países.

O trabalho culmina no desenvolvimento de uma ferramenta que permite à Tecnilima apresentar de melhor forma esta solução energética a potenciais clientes e explorar esta oportunidade de mercado. Com a ferramenta desenvolvida pretende-se promover a utilização desta energia renovável, através de uma apresentação que permita a explicação do conceito, das vantagens associadas a este e a demonstração da sua viabilidade financeira a potenciais futuros clientes.

Economic analysis of geothermal energy as an energy solution for buildings in Portugal

Abstract

The present thesis, carried out at Tecnilima, explores the potential of shallow geothermal energy as an energy solution in the Portuguese market.

The shallow geothermal energy market in Portugal, unlike some European countries, is underdeveloped. The use of this energy can meet the energy needs of the Portuguese buildings, namely space heating, cooling and also hot water supply. The development of this market is dependent on numerous factors. It is then essential to identify key barriers and possible actions that could accelerate the market development and also study more developed markets to see what measures can be replicated. The understanding of technological aspects is also vital, the advantages over the alternatives and the general energy panorama, in order to allow the company to develop a suitable value proposition.

The potential of the using this energy, which is right under our feet, is unknown by a large part of the Portuguese public. The present work intends to present a renewable alternative, the shallow geothermal, presenting not only its technical validity but also its financial feasibility through the exposition and analysis of two case studies. Understanding the concept as well as the environmental advantages and the financial savings will allow a greater awareness of the technology and possible dissemination in Portugal, as happens in other countries.

The work ends with the development of a tool that allows Tecnilima to better present this energy solution to potential customers and to explore this market opportunity. With the developed tool, it is intended to promote the use of this renewable energy, through a presentation that allows the explanation of the concept, the associated advantages and the demonstration of its financial viability to potential future clients.

Agradecimentos

Gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos que direta ou indiretamente, me ajudaram e fizeram com que a realização deste projeto fosse possível.

À Professora Maria Dulce Soares Lopes pela disponibilidade, orientação e apoio prestado desde o início.

A toda a equipa da Tecnilima, em particular ao Eng.º Gustavo Ribeiro, ao Eng.º Paulino Maganete, ao Guilherme Brito, ao Diogo Maganete, ao Rafael Fernandes e ao Julien Costa pelo fantástico ambiente de trabalho, colaboração e confiança.

A todos os meus amigos e companheiros de curso, em especial ao José Ribeiro, ao Miguel Costa, ao Gonçalo Rocha, ao João Moreira e ao Gonçalo Pinheiro não só pela companhia, mas como amigos que levo para a vida.

A todos os Professores da FEUP, pela paciência e conhecimento transmitido ao longo destes cinco anos.

À minha família, um especial obrigado, pela força e por tornar tudo isto possível.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	6
1.1	Enquadramento do projeto e motivação	6
1.2	A Tecnilima	7
1.3	Objetivos do projeto	8
1.4	Metodologia	8
1.5	Estrutura da dissertação	9
2	Estratégia Energética Europeia e Portuguesa	10
2.1	Situação atual	11
2.1.1	Consumo de energia	11
2.1.2	Uso de Recursos renováveis	11
2.1.3	Emissões de CO2	12
2.2	Enquadramento da geotermia no plano estratégico	12
3	Geotermia	14
3.1	Componentes de um sistema GSHP	15
3.1.1	Bomba de calor	15
3.1.2	Ligação à terra	18
3.1.3	Sistemas de distribuição	21
3.2	Mercado	24
3.3	Situação em Portugal	30
3.4	Apresentação desenvolvida	33
4	Viabilidade financeira da geotermia	35
4.1	Critérios de viabilidade financeira para comparação entre sistemas energéticos	35
4.2	Casos de estudos na literatura	38
4.3	Casos de estudo analisados	39
4.3.1	Caso de estudo 1	41
4.3.2	Caso de estudo 2	46
4.4	Ferramenta de cálculo	51
5	Conclusões e perspectivas de trabalho futuro	52
	Referências	53
	ANEXO A: Apresentação desenvolvida	56
	ANEXO B: Resultados da análise de sensibilidade	61
	ANEXO C: Ferramenta de cálculo	68

Siglas

ADENE – Agência para a Energia

APG – Associação Portuguesa de Geólogos

AQS – Águas Quentes Sanitárias

ASHP – Bomba de Calor Aerotérmica

BC – Bomba de Calor

CO₂ – Dióxido de Carbono

COP – Coeficiente de Performance

DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia

GEE – Gases Efeito Estufa

GS – Geotermia Superficial

GSHP – Bomba de Calor Geotérmica

LCC – Custos de Ciclo de Vida

LCoHC – Custos Nivelados de Aquecimento e Arrefecimento

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia

PCI – Poder Calorífico Inferior

PPGS – Plataforma Portuguesa da Geotermia Superficial

PRA – Período de Recuperação Atualizado

RES – Fontes de Energia Renovável

SPF – Índice de Performance Sazonal

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

UE – União Europeia

VAL – Valor Atual Líquido

Índice de Figuras

Figura 1 – Modelo conceptual de uma bomba de calor e ciclo entalpia-pressão (Naicker, 2015).....	16
Figura 2 – Esquema de uma bomba de calor (adaptado de Dimplex)	17
Figura 3 – Configurações de circuito aberto (adaptado de Swenka, 2008)	19
Figura 4 – Configurações de circuito fechado horizontais (adaptado de Swenka, 2008)	20
Figura 5 – Configurações de circuito fechado verticais (adaptado de Swenka, 2008).....	20
Figura 6 – Esquema de funcionamento no modo de aquecimento (adaptado de Dimplex)	22
Figura 7 – Esquema de funcionamento no modo de arrefecimento (adaptado de Dimplex) ..	23
Figura 8 – Número de instalações de sistemas GSHP em 2015 (Rees, 2016)	25
Figura 9 – Número de instalações de GSHP per capita (Milhão de habitantes) em 2015 (Rees, 2016).....	25
Figura 10 – Áreas de intervenção da PPGS (Ramalho <i>et al</i> , 2014).....	31
Figura 11 – Ações e iniciativas da PPGS (Ramalho <i>et al</i> , 2014)	31
Figura 12 – Ilustração do LCoHC (FROnT, 2016)	37
Figura 13 – Custos de ciclo de vida acumulados para cada perfil.....	43
Figura 14 – Diagramas de fluxos de caixa diferenciais, na perspetiva dos diferentes perfis ...	44
Figura 15 - Variação no consumo energético dos diferentes recursos	45
Figura 16 – Custos de ciclo de vida acumulados para cada perfil.....	47
Figura 17 – Diagramas de fluxos de caixa diferenciais, na perspetiva dos diferentes perfis ...	48
Figura 18 – Variação no consumo energético dos diferentes recursos.....	48
Figura 19 – Evolução dos custos de ciclo de vida acumulados	49
Figura 20 – Evolução dos custos de ciclo de vida acumulados	50
 Figura A. 1 – Slide 1	 56
Figura A. 2 – Slide 2.....	56
Figura A. 3 – Slide 3.....	57
Figura A. 4 – Slide 4.....	57
Figura A. 5 – Slide 5.....	58
Figura A. 6 – Slide 6.....	58
Figura A. 7 – Slide 7	59
Figura A. 8 – Slide 8.....	59
Figura A. 9 – Slide 9.....	60
Figura A. 10 – Slide 10.....	60

Figura C. 1 - Dados de entrada: Pressupostos	68
Figura C. 2 - Dados de entrada: Consumos energéticos por fonte de combustível	68
Figura C. 3 - Dados de entrada: Custos de investimento.....	69
Figura C. 4 - Dados de entrada: Necessidades e Custos (anuais e periódicos)	69
Figura C. 5 - Resultados financeiros	69

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Metas energéticas UE e portuguesas (adaptado de Comissão Europeia, 2015)	11
Tabela 2 – Número total de GSHP em operação na UE em 2015 (EurObserv'ER, 2016)	27
Tabela 3 – Número de unidades de GSHP vendidas na UE em 2015 (EurObserv'ER, 2016).	28
Tabela 4 – Análise SWOT (Diaz, 2014).....	32
Tabela 5 – Preços por kWh das fontes de energia (E.N.M.C.; EDP)	41
Tabela 6 – Necessidades térmicas anuais	42
Tabela 7 – Custos de investimento	42
Tabela 8 – Estrutura de custos	43
Tabela 9 – Resultados dos critérios financeiro para cada perfil de cliente.....	43
Tabela 10 – Necessidades térmicas anuais	46
Tabela 11 – Custos de investimento	46
Tabela 12 – Estrutura de custos	47
Tabela 13 – Resultados dos critérios financeiro para cada perfil de cliente.....	47
 Tabela B. 1 - Análise sensibilidade Caso de estudo 1 Perfil A	62
Tabela B. 2 - Análise sensibilidade Caso de estudo 1 Perfil B	63
Tabela B. 3 - Análise sensibilidade Caso de estudo 1 Perfil C	64
Tabela B. 4 - Análise sensibilidade Caso de estudo 2 Perfil A	65
Tabela B. 5 - Análise sensibilidade Caso de estudo 2 Perfil B	66
Tabela B. 6 - Análise sensibilidade Caso de estudo 2 Perfil C	67

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

As alterações climáticas e todas as consequências que daí advêm são assustadoras. É necessário trabalhar mais e melhor nas alternativas que nos surgem diariamente, para que as gerações vindouras não sofram irreversivelmente com os danos. O esforço tem sido feito em várias frentes e a consciencialização da população não pode ser feita passivamente. As alterações climáticas são vistas como um problema distante, mas ninguém se sente culpado por um problema que não é facilmente visível e sente que pode ter um impacto significativo. Só em grupo podemos resolver o problema, visto que esta terceirização das responsabilidades torna fácil perceber a luta que têm sofrido cientistas e legisladores.

A emissão de gases de efeito estufa e o seu impacto nas alterações climáticas, são temas que ocupam as agendas políticas e têm enorme importância ambiental, social e económica. No centro das razões levantadas do agravamento do efeito estufa, estão as emissões de enormes quantidades de CO₂ resultantes de atividades humanas. A queima dos combustíveis fósseis é uma das causas principais pelo aumento das emissões deste tipo de gases. Os combustíveis fósseis são recursos finitos, não renováveis à escala de tempo humana, e a nossa dependência deles eleva a pressão da busca de alternativas viáveis. A solução passa pelo investimento e implementação de novas fontes de energia renovável, mais abrangentes e menos poluentes.

O setor da construção (residencial e não residencial), é um dos setores que mais energia consome e, por isso, apresenta uma das melhores oportunidades para reduzir economicamente o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa (Hughes, 2008). A redução no consumo de energia, passa também por mudanças no paradigma da arquitetura e engenharia das construções. É necessário um esforço múltiplo, que permita o projeto e construção de edifícios com maior eficiência energética e que suportem o uso de energias renováveis, para que possam ser mais sustentáveis. A escolha entre sistemas energéticos, como outras decisões numa sociedade, é produto do desenvolvimento histórico, dos valores sociais e muitas vezes do papel de indivíduos influentes de várias camadas da sociedade: quer decisores políticos, industriais ou figuras intelectuais (Sørensen, 2011). Por esta razão, o esforço tem de ser feito em várias frentes, sensibilizando não só o consumidor, mas também os projetistas, instaladores, decisores políticos e outros organismos influentes.

A climatização de edifícios e produção de águas quentes sanitárias (AQS) consomem uma grande porção da energia total consumida. Sendo maioritariamente derivada de fontes de energia fóssil. O aproveitamento a larga escala do potencial da energia geotérmica superficial, pode mudar este paradigma. Os recursos geotérmicos podem ser divididos de acordo com a entalpia. No presente trabalho, o foco são recursos de muito-baixa entalpia que estão disponíveis quase globalmente. O aproveitamento deste tipo de recurso, é conseguido através de bombas de calor geotérmicas, permitindo a climatização de espaços (aquecimento e arrefecimento) e a produção de AQS.

As bombas de calor geotérmicas também comumente designadas na literatura estrangeira como ground-source heat pump (GSHP), geothermal heat pumps (GHP), GeoExchange, earth-coupled ou ground-source, provam ser capazes de satisfazer as necessidades deste setor e eficazmente reduzir o consumo de energia e as emissões de gases, devido aos seus níveis de eficiência demonstrados (Carvalho *et al*, 2015). O conceito consiste em utilizar a temperatura pouco volátil do subsolo, como fonte de calor durante a estação fria e como recetor de calor durante a estação quente. Estes sistemas aproveitam as temperaturas constantes do subsolo, sem variação sazonal, permitindo usufruir de vantagens a nível da eficiência. Isto porque a temperatura do subsolo é mais morna do que a do ar no inverno e mais fresca no verão.

O aproveitamento da geotermia superficial apresenta inúmeras vantagens. Para além de utilizar uma energia renovável e ecológica, devido à reduzida emissão de gases para a atmosfera, permite poupanças significativas resultantes dos altos níveis de eficiência conseguidos. Esta energia é ainda independente de condições externas e funciona sem intermitências, ao contrário de outras fontes de energia renovável, como a solar e a eólica. É, por isso, encarada como uma forma de energia contínua, disponível 24h/dia.

Em Portugal, o potencial não está a ser aproveitado na sua essência devido a inúmeros fatores. O mercado está pouco desenvolvido, conferindo uma excelente oportunidade às empresas do setor energético. Esta tecnologia tem recebido pouca atenção e prova disso é o desconhecimento deste tipo de sistemas por parte da população e principais agentes decisores. A promoção e divulgação das vantagens, permitirá que pelo menos, esta tecnologia seja tida em conta como possível solução energética no momento da tomada de decisão. Portugal para além das necessidades de aquecimento e produção de AQS, necessita de um sistema que permita o arrefecimento, devido às altas temperaturas verificadas nos meses de verão. Os sistemas de GSHP permitem suprir estas diferentes necessidades tendo ainda a vantagem de oferecer arrefecimento passivo no verão. Conferindo uma enorme vantagem, tanto em termos ambientais como económicos. As potencialidades desta energia renovável são imensas e permitem que Portugal esteja mais próximo de atingir as metas europeias a que se comprometeu.

1.2 A Tecnilima

A Tecnilima é uma empresa importadora e distribuidora que comercializa soluções energéticas. Fundada em 1994, rapidamente se ajustou e acompanhou as necessidades do mercado. Fruto dos seus valores e responsabilidade social, iniciou as suas operações no mercado das energias renováveis e alternativas, tornando-se um parceiro privilegiado de grandes marcas internacionais do setor. Tem como visão “criar soluções energéticas de futuro, através de meios tecnológicos e ambientalmente sustentáveis”. Por esta razão, aposta nas tecnologias inovadoras. Procura ser reconhecida como uma organização que cria valor em todas as geografias pela sua modernidade, criatividade, capacidade para inovar, implementar e executar.

Este projeto surgiu de forma a permitir que a empresa possa apresentar uma solução diferente aos seus clientes e se diferenciar da sua competição.

1.3 Objetivos do projeto

O presente projeto tem como objetivo o desenvolvimento de ferramentas que permitam à Tecnilima explorar a geotermia superficial e potenciar esta tecnologia no mercado português. Desta forma, conferir a possibilidade de apresentação da geotermia como solução energética na matéria da climatização de espaços e produção de águas quentes sanitárias a potenciais clientes.

Hughes (2008) e outros autores compilaram diversas barreiras que estão a dificultar a disseminação desta tecnologia, e uma das principais barreiras reportadas é o elevado investimento inicial que este tipo de sistemas necessita. Este entrave serve como âncora na tomada de decisão e impede os clientes de se aperceberem dos benefícios económicos decorrentes da alta eficiência alcançada por este tipo de sistemas.

Este trabalho foi desenvolvido, com vista a resolver este problema e endereçar outros levantados como barreiras. Aqui serão analisados dois casos de estudo que demonstram que os elevados custos iniciais não inviabilizam financeiramente a geotermia. Foram desenvolvidas uma folha de cálculo e também uma apresentação técnica que complementará a exposição. A ferramenta de cálculo permitirá à empresa apresentar os argumentos financeiros e estudar a viabilidade para potenciais clientes. Com esta apresentação e a ferramenta de cálculo será possível não só a explicação da tecnologia, do seu funcionamento e das diversas vantagens face a outros sistemas, mas também elaborar um estudo financeiro que permita uma tomada de decisão mais consciente pelo cliente. Com estas duas ferramentas, em simultâneo, pretende-se munir a empresa com capacidades que permitam persuadir os clientes e explorar o mercado da geotermia superficial em Portugal.

1.4 Metodologia

A metodologia seguida foi desenvolvida de modo a responder à questão de partida: será a geotermia superficial uma opção viável, técnica e financeiramente, como solução energética para climatização e aquecimento de águas sanitárias em Portugal? Para responder a esta pergunta, estudou-se o enquadramento da tecnologia no plano estratégico energético e fez-se um levantamento dos aspetos técnicos e de mercado, de forma a desenvolver ferramentas que permitam atingir o objetivo final, que é a exploração desta tecnologia em Portugal.

Inicialmente foi enquadrada a tecnologia no plano estratégico energético europeu e nacional, e feito o levantamento de estudos que ajudem a perceber em que medida a implementação da tecnologia pode contribuir no alcance das metas estabelecidas. Este enquadramento é importante, porque o desenvolvimento do mercado depende de esforços governamentais nesse sentido. Os esforços podem ser sob a forma de disponibilização de subsídios ou outros incentivos. Nesse sentido, é relevante perceber o alinhamento da tecnologia com o plano estratégico.

Feito o enquadramento, procedeu-se ao levantamento técnico da geotermia. Com este levantamento pretende-se clarificar a tecnologia, como funciona, as componentes que integram o sistema e as vantagens face às alternativas.

Após o estudo técnico, foi realizado um levantamento do mercado mundial e europeu, evolução histórica e dos fatores que potenciaram ou inibiram a disseminação da tecnologia. O estudo de outros mercados, com maiores taxas de implementação, permite despistar fatores que propiciam o seu desenvolvimento. De seguida, foram identificadas barreiras e possíveis ações para as ultrapassar, e feito um levantamento do que está a ser realizado em Portugal.

Com vista a responder a um dos fatores que é tido como uma barreira, o elevado investimento inicial, foram estudados dois casos reais relativos à implementação desta tecnologia em Portugal. Estes dois casos permitem a apresentação de argumentos financeiros que

demonstram a viabilidade financeira deste tipo de sistemas. Para análise destes casos foi feito um levantamento dos custos e dos critérios de decisão financeiros relevantes para a tomada de decisão.

Por fim, com base no estudo desenvolvido e na revisão bibliográfica, foi construída uma apresentação que permite a apresentação técnica da geotermia a potenciais clientes. E através dos dois casos de estudo, foi desenvolvida uma ferramenta de cálculo que suportará a apresentação da viabilidade financeira da geotermia e permitirá o estudo de casos específicos de clientes.

1.5 Estrutura da dissertação

O presente trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. Neste primeiro capítulo é realizada uma introdução ao tema do projeto e sua relevância, salientando as motivações, metodologia e objetivos pretendidos.

No capítulo 2, é apresentado o plano estratégico energético da União Europeia, compromissos portugueses, e apresentadas as metas e progressos nesse sentido. A tecnologia é enquadrada no plano estratégico, através da apresentação de estudos sobre o impacto nestas metas com a disseminação de fontes de energia renovável, nomeadamente através do uso de bombas de calor, onde se insere a tecnologia GSHP.

No capítulo 3, é feita uma explicação técnica dos sistemas GSHP, onde são apresentados os componentes e os conceitos de funcionamento. Neste capítulo é também feito um levantamento do mercado deste tipo de sistemas e sua evolução a nível mundial e europeu. São explorados os fatores que influenciam a disseminação desta tecnologia, é apresentada a situação em Portugal e exposto um caso de uma implementação de sucesso. Por fim, com base nos aspetos relevantes revistos, é apresentada a ferramenta desenvolvida para apresentação técnica da geotermia. A ferramenta foi desenvolvida com vista a permitir uma melhor maneira de apresentar esta tecnologia, por parte da empresa, a potenciais clientes.

No capítulo 4, é estudada a viabilidade financeira da geotermia. Inicialmente, são apresentados os critérios de decisão financeiros relevantes para a tomada de decisão. De seguida, são apresentados estudos realizados por outros autores neste âmbito, e analisados dois casos verificados em Portugal. Baseado nos estudos analisados, foi desenvolvida a ferramenta de cálculo que permitirá estudar a viabilidade financeira da geotermia a futuros clientes.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e perspetivas de trabalho futuro.

2 Estratégia Energética Europeia e Portuguesa

As alterações climáticas são reais e um dos maiores desafios da nossa sociedade. No último século, estas alterações sofreram uma enorme aceleração e caso não se tomem medidas, as consequências podem ser irreversíveis. O impacto das alterações climáticas, tem ocupado e preocupado a comunidade científica. O estudo dos impactos ambientais decorrentes das alterações climáticas, bem como o do impacto que mudanças comportamentais teriam no futuro, são alguns dos tópicos em que se debruçam os cientistas e legisladores.

A União Europeia, com vista a atacar este problema, estabeleceu metas energéticas para vários horizontes temporais. Os estados membros comprometeram-se a atingir as suas metas específicas e a reportar os avanços nesse sentido. No curto, médio e longo-prazo, estas metas não conseguirão ser alcançadas sem uma forte implementação de recursos renováveis nas soluções para aquecimento e arrefecimento. A mudança para fontes de energia renovável neste setor energético, permitirá não só reduzir as emissões de gases de efeito estufa, como também reduzir o risco de crises energéticas e subidas de preços; diminuir importações de energia e desenvolver indústrias inovadoras e competitivas que permitirão criar novos empregos e impulsionar o crescimento sustentável na União Europeia (FROnT, 2016).

Neste capítulo, serão apresentados os objetivos, a situação atual e o papel que a geotermia poderá desempenhar neste plano estratégico.

Nos objetivos energéticos da estratégia Europa 2020, é possível ler:

- aumentar em 20% a eficiência energética (significando que o consumo de energia primária não pode exceder 17,140 TWh);
- obter 20% da energia a partir de fontes renováveis (cerca de 2850 TWh);
- reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em 20% (relativamente aos níveis registados em 1990, redução equivalente a cerca de 1100 Mt CO₂. Se forem reunidas as condições necessárias, o objetivo é de 30%).

No seguimento destas diretrizes, Portugal comprometeu-se, para a mesma data, a reduzir em 1% as emissões de gases com efeito de estufa comparativamente aos níveis de 2005; a que pelo menos 31% da energia bruta consumida provenha de fontes renováveis; e aumentar a eficiência energética em 22,5% (Comissão Europeia, 2015). Estas metas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Metas energéticas UE e portuguesas (adaptado de Comissão Europeia, 2015)

Metas	Metas na redução das emissões (comparativamente aos níveis de 2005)	Quota de recursos renováveis (em % do consumo final bruto de energia)	Eficiência Energética
Meta UE	20% (comparativamente aos níveis de 1990)	20%	20%
Portugal	1%	31%	22,50%

2.1 Situação atual

2.1.1 Consumo de energia

O consumo de energia interna bruta na UE, em 2015, foi de 1 627 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe), abaixo 2,5% do nível de 1990 e 11,6% do pico registado em 2006 (1 839 Mtoe). O mix de recursos foi composto por essencialmente 5 fontes diferentes: derivados de petróleo (34,4%), gás natural (22%), combustíveis sólidos (16,1%), energia nuclear (13,6%) e energia renovável (13%).

Em Portugal, para o mesmo período, o consumo foi de 23 Mtoe, 1,4% do consumo da UE, o mix foi composto por: derivados de petróleo (45,2%), gás natural (17,7%), energia renovável (21,6 %) e combustíveis sólidos (13,9 %) (Eurostat).

2.1.2 Uso de Recursos renováveis

Em 2015, a percentagem referente à energia de origem renovável no consumo final bruto de energia alcançou os 16,7% na UE, quase o dobro de 2004 (8,5%), o primeiro ano em que a informação ficou disponível. O target pretendido é de 20% para 2020. Este é um dos indicadores “chave” na estratégia Europa 2020, por essa mesma razão e no seguimento da estratégia, os estados membros concordaram atingir pelo menos 27% em 2030. Entre os 28 Estados Membros, em 2015, 11 já tinham atingido as suas metas nacionais para 2020. A meta nacional para 2020 em Portugal é de 31%. Registrando em 2015 28% (Eurostat, 2017d).

Do consumo bruto de eletricidade em 2015, em Portugal, 52,6% foram de origem renovável, registando um crescimento de apenas 0,5%, face a 2014 (52,1%), mas significativo face aos 28,8% da UE (28 países). Em 2004, Portugal registava o valor de 27,5%. Cerca de 18,6% do total da energia usada em aquecimento e arrefecimento na UE (28 países), provinha de fontes de energia renovável. Registrando um crescimento significativo desde os 10,2% de 2004. Em Portugal, o valor foi de 33,4% em 2015, menos 0,6% que em 2014 (34%) (Eurostat, 2017a).

Em 30 de novembro de 2016, com o objetivo de assegurar a liderança global da União Europeia nas energias renováveis e atingir a meta definida para 2030, a Comissão Europeia publicou uma proposta para a revisão das diretivas relativa às energias renováveis. Nesta proposta é possível ler que um dos objetivos específicos é, citando:

“desenvolver o potencial das energias renováveis no setor do aquecimento e da refrigeração” (Comissão Europeia, 2017).

Para 2030, para além da meta de pelo menos 27% da energia final consumida seja de origem renovável, os Estados Membros da União Europeia pretendem: uma redução de 40% na emissão dos gases de efeito estufa face aos níveis de 1990 e poupanças de 27% no consumo de energia (Comissão Europeia).

Apesar dos esforços e investimentos significativos em fontes de energia renovável, Portugal ainda apresenta uma forte dependência energética do exterior. Segundo os últimos dados do Eurostat, a média da dependência energética portuguesa é 77,4% em 2015. Significativamente superior à média europeia (28 países) que foi de 54% (Eurostat).

2.1.3 Emissões de CO₂

As emissões de CO₂ são as que mais contribuem para o aquecimento global na União Europeia, representando cerca de 80% de todas as emissões de gases de efeito estufa (GEE). As emissões são influenciadas por inúmeros fatores como as condições climáticas, crescimento económico, tamanho da população, transportes e atividades industriais.

Em 2015, as emissões de GEE na UE (28 países) diminuíram 22% em comparação com os níveis de 1990, representando uma redução absoluta de 1 265 milhões de toneladas de equivalentes de CO₂, colocando a UE acima da meta de 2020, que é reduzir as emissões de GEE em 20% até 2020 (Eurostat, 2017b).

Segundo estimativas do Eurostat, em 2016 na UE, as emissões de CO₂ diminuíram ligeiramente face a 2015 (0,4%). De acordo com as estatísticas, as emissões aumentaram na maioria dos países, por outro lado, 11 estados membros registaram reduções. Onde Portugal demonstrou um decréscimo de 5,7% face ao ano anterior (2015). No global, Portugal contribui para 1,4% do total das emissões registadas na UE em 2016 (Eurostat, 2017c).

2.2 Enquadramento da geotermia no plano estratégico

O estudo do alinhamento da tecnologia GSHP no plano estratégico europeu, bem como o seu potencial no alcance das metas estabelecidas, é relevante. Este alinhamento, ditará a probabilidade da existência de incentivos governamentais futuros, que permitirão uma maior disseminação da tecnologia.

Em fevereiro de 2016, a Comissão Europeia propôs uma estratégia para o aquecimento e arrefecimento na UE. Neste documento é possível ler que o aquecimento e arrefecimento representa metade da energia total consumida na UE e que o desenvolvimento de uma estratégia que torne este consumo mais eficiente e sustentável é uma prioridade.

No mesmo documento lê-se que em 2012, o aquecimento e arrefecimento foi responsável por 50% (546 Mtoe) da energia final consumida na UE, sendo o maior setor energético. Para o mesmo ano, 18% do suprimento da energia primária foi feito por fontes de energia renovável, enquanto que os combustíveis fósseis representaram 75%. O aquecimento de espaços representa mais de 80% do consumo nos climas frios. Em climas mais moderados, a refrigeração de espaços é mais importante – e está a crescer (Comissão Europeia, 2016).

Segundo o estudo de Carvalho *et al* (2015), o uso em larga escala de bombas de calor para a climatização de espaços pode ter um papel importante na penetração das fontes de energia renovável (RES) e efetivamente contribuir para a substituição do consumo de combustíveis fósseis, particularmente no decréscimo da crescente dependência de gás natural na Europa e em outros países. Este uso de bombas de calor contribuirá para uma significativa poupança na energia primária e redução nas emissões de CO₂, quando comparadas com outras soluções comumente utilizadas, como caldeiras a gás natural. O setor da construção (residencial e não-residencial) é o principal responsável pelo aumento da dependência do gás natural, sendo responsável por 61% do total de importações de gás natural. Em 2012, o aquecimento de

espaços representava 45% do total de consumo final de gás natural na UE. Por esta razão, mudanças neste setor assumem uma relevante importância, e permitirão à UE estar mais perto de atingir as suas metas e reduzir a dependência externa e de gás natural. Através da substituição das caldeiras de gás natural por bombas de calor de alta eficiência para a climatização de espaços, na Europa, em 2050, será possível poupanças na ordem dos 60% na energia primária requerida e redução de 90% das emissões de CO₂. Isto permitirá, a nível global, um abatimento de 50% na dependência dos fornecedores externos e uma contribuição de 5,6% na quota das fontes de energia renovável (RES) no consumo final total de energia.

No mesmo estudo, para o caso particular português, com um programa ambicioso de implementação de RES e com os níveis de performance sazonal obtidos experimentalmente, podem ser poupados 67% da energia primária consumida pelas existentes caldeiras a gás e petróleo, e reduzidas as emissões de CO₂ em 97% em 2050.

Estudos similares, destacados pelos mesmos autores, revelam resultados idênticos. Como Bayer *et al* (2012), que estudou as poupanças em termos de emissões de gases de efeito estufa derivados do aquecimento de espaços em 19 países europeus, resultantes da substituição (já realizada) dos sistemas convencionais por sistemas GSHP. Bayer estimou poupanças de 3,8Mt de emissões, representando 0,74% do total. Os mesmos autores estimaram que caso todas as caldeiras alimentadas a lenha, combustíveis fósseis e eletricidade fossem substituídas por GSHP com um índice de performance sazonal (SPF) superior a 3,5, seriam possíveis poupanças em média até 30% nas emissões de emissões de CO₂ no aquecimento de espaços. Sendo que este impacto seria ainda mais significativo caso se considerassem níveis de performance superiores e com o uso mais alargado de fontes de energia renovável na geração de eletricidade.

Ecofys (2013) estudou o impacto de diferentes taxas de penetração de bombas de calor em oito países europeus até 2030. Este estudo estimou para cada um dos três cenários desenhados, as emissões de CO₂ e as poupanças na energia primária conseguidas até 2030, no aquecimento e arrefecimento de edifícios e produção de AQS. Foi também estimado a contribuição desta penetração na quota de RES. No cenário otimista (implementação em 100% dos edifícios novos e 50% dos reabilitados), em 2030, verifica-se uma queda de 46% das emissões de CO₂ (menos 296Mt) e poupanças de 39% (1260 TWh) na energia primária em relação aos valores de 2012. Atingindo neste cenário, a quota de RES referente às bombas de calor de 9,8% da energia final bruta.

De Almeida *et al* (2004), avaliaram as oportunidades no setor residencial em Portugal, na mudança de fontes de combustível e concluíram que o uso de bombas de calor revelou-se uma opção atrativa, quer em termos de consumos de energia, quer em emissões de CO₂. Neste estudo analisaram 17 opções tecnológicas diferentes, de acordo com as necessidades de consumo das famílias portuguesas. O uso de bombas de calor para o aquecimento tanto do espaço como de água, combinado com o uso de fogão a gás (para cozinhar), mostrou ser a solução que leva a menos consumo de energia e de emissões de CO₂. Considerando apenas os custos operacionais, esta opção permite 45% menos de custos que um sistema de aquecimento central a gás natural combinado com fogão a gás, e 60% mais económico que o pior caso (aquecimento de espaço e de água a resistência elétrica e fogão elétrico para cozinhar).

Curtis *et al* (2005), no seu levantamento do estado da implementação de sistemas GSHP, em 2005, destacaram a relevância destes sistemas, citando um relatório canadense que dizia: “É improvável que haja uma tecnologia singular, no setor da construção, com tanto potencial na redução das emissões de gases de efeito estufa, e consequente impacto no aquecimento global do que os sistemas GSHP”.

3 Geotermia

A geotermia na perceção pública, é comumente associada apenas ao aproveitamento das chamadas “altas entalpias”, cujos aproveitamentos permitem a produção de energia elétrica. Com os avanços tecnológicos, o potencial de aproveitamento desta energia é mais amplo. Segundo a Norma VDI 4640, a definição adotada pelo conselho Europeu de Energia Geotérmica é: “... a energia armazenada na forma de calor sob a superfície terrestre”.

Este calor tem duas origens: uma externa e outra interna. A origem externa deve-se sobretudo à radiação solar e à chuva, sendo estas praticamente as únicas fontes de calor significativas existentes até aos 15 metros de profundidade. A origem interna é responsável pelas temperaturas em profundidades que ultrapassam os 20 metros. Estas temperaturas devem-se ao calor produzido pela desintegração nuclear de substâncias radioativas presentes nas rochas do subsolo (Caleffi, 2011).

Dependendo da temperatura disponível do recurso, a energia geotérmica pode ser usada essencialmente de três formas diferentes: geração de eletricidade, aquecimento direto e indireto e arrefecimento via bombas de calor geotérmicas (Self *et al*, 2013).

Segundo Madureira (2013), o recurso geotérmico pode ser dividido em quatro categorias, de acordo com a sua temperatura e potencial de aproveitamento:

- Alta entalpia (temperaturas superiores a 180°C);
- Média entalpia (temperaturas entre 90°C e 180°C);
- Baixa entalpia (temperaturas entre 30°C e 90°C);
- Muito baixa entalpia (temperaturas abaixo de 30°C).

Segundo o mesmo autor, é comum também classificar-se:

- Geotermia Profunda (profundidades superiores a 400 metros, cujo aproveitamento permite produção de eletricidade, aproveitamento em processos industriais e uso direto em climatização e águas quentes);
- Geotermia Superficial (profundidades inferiores a 400 metros, cujo aproveitamento, mediante a utilização de bombas de calor, permite a climatização de espaços e águas quentes sanitárias).

Neste trabalho o foco será a geotermia superficial.

Madureira (2013) enumera também as diversas possibilidades de aplicações deste recurso energético, em variados setores de atividade:

- Setor residencial - habitações, edifícios de serviços, escritórios, etc.;
- Setor público - estações de metro, edifícios públicos, degelo em estradas, etc.
- Setor turístico e desportivo – piscinas, balneários (termas), campos de futebol, spas, etc.
- Setor agrícola e piscícola - estufas, aviários, suiniculturas, pisciculturas, etc.
- Setor industrial - adegas, secagem, etc.

Os recursos geotérmicos de baixa temperatura são abundantes. Extrair tal energia é relativamente simples, uma vez que as profundidades envolvidas são normalmente pequenas. O aproveitamento desta energia é conseguido através de bombas de calor geotérmicas que extraem a energia térmica do recurso e a elevam até à temperatura requerida (Self *et al*, 2013). O conceito consiste em utilizar a temperatura natural do subsolo como fonte de calor durante a estação fria e como recetor de calor durante a estação quente. Basicamente estas temperaturas constantes do subsolo, sem variação sazonal, permitem vantagens a nível da eficiência. Uma vez que a temperatura do subsolo é mais morna do que a do ar no inverno e mais fresca no verão.

3.1 Componentes de um sistema GSHP

Segundo Ruqun (2009), as componentes de um sistema de bomba de calor geotérmica podem ser divididas em:

- Bomba de calor. É o coração do sistema GSHP. Opera de acordo com os princípios das convencionais bombas de calor;
- Ligação à terra. É através desta ligação que o calor é extraído ou entregue no subsolo. É um permutador de calor exterior. Este permutador pode ter várias configurações;
- Sistema de distribuição. Sistema localizado no interior do edifício. É através dele que é entregue ou extraído o calor da habitação.

3.1.1 Bomba de calor

As fundações e desenvolvimento do conhecimento sobre máquinas térmicas remontam ao início e meio do século 19, cujos cientistas são facilmente associados à termodinâmica clássica. Nomes como Carnot, Joule, Rankine e Kelvin. Embora hajam inúmeras publicações científicas sobre aplicações de máquinas térmicas, é William Thomson's (depois Lord Kelvin) de 1852, que recebe o crédito por ser a primeira aplicação explícita das possibilidades da utilização de máquinas de calor na climatização de edifícios (Rees, 2016).

As bombas de calor são uma forma de máquina térmica que utilizam trabalho mecânico para transferir calor de uma fonte fria para uma fonte quente, através de ciclos de compressão de vapor (semelhante ao frigorífico, mas invertido). O leque de aplicações é amplo, mas neste contexto o pretendido é transferir calor entre edifícios e o ambiente externo – tanto transferir o calor do edifício para o exterior, arrefecendo o edifício, como extrair calor do ambiente externo transferindo o mesmo para o edifício aquecendo-o (Rees, 2016; Naicker, 2015).

O ciclo de compressão de vapor utiliza as propriedades do fluido de trabalho que muda de estado durante os processos de evaporação, compressão, condensação e expansão. Através deste ciclo o calor é transferido entre as duas fontes. Este fluido de trabalho é normalmente um refrigerante, que é escolhido de acordo com as características e requisitos do sistema (Naicker, 2015; Self *et al.*, 2013).

As componentes principais do ciclo podem ser vistas à esquerda na Figura 1. O estado do refrigerante ao longo do ciclo está ilustrado no diagrama pressão-entalpia à direita da Figura 1. As mudanças de entalpia no condensador e evaporador indicam a taxa de transferência de calor por unidade de massa do refrigerante circulante (Rees, 2016).

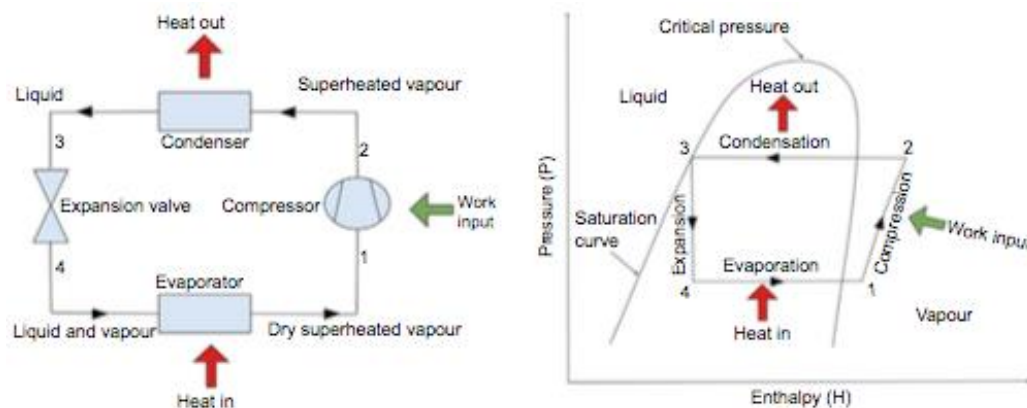


Figura 1 – Modelo conceptual de uma bomba de calor e ciclo entalpia-pressão (Naicker, 2015)

Naicker (2015), explica em pormenor o que acontece em cada estágio:

- Evaporação (4-1): quando o refrigerante passa pelo evaporador. O refrigerante absorve o calor da fonte (subsolo) e muda de estado de líquido para vapor a pressão constante. O vapor entra no compressor;
- Compressão (1-2): a pressão do vapor é elevada. O compressor utiliza energia elétrica neste processo;
- Condensação (2-3): o vapor a alta temperatura condensa passando ao estado líquido enquanto passa pelo condensador. A condensação acontece a uma pressão constante e rejeita o calor. Este calor é então utilizado para aquecer o espaço ou produzir água quente;
- Expansão (3-4): o líquido condensado de alta pressão passa pela válvula de expansão que diminui a sua pressão para a do evaporador.

O refrigerante precisa de atingir uma temperatura baixa o suficiente, quando expandido, para que o calor possa fluir do ambiente frio para o refrigerante no evaporador, e atinja uma temperatura alta o suficiente, quando comprimido, para libertar calor através do condensador. A diferença de pressão deve ser grande o suficiente para que o fluido condense no lado quente e evapore no lado frio. Quanto maior a diferença de temperatura, maior a diferença de pressão necessária e, consequentemente, maior a energia requerida no compressor. Consequentemente quanto maior a diferença de temperaturas entre as fontes, menor a eficiência da bomba de calor.

O sistema pode incluir um modo de refrigeração que remove energia térmica do espaço e a rejeita no subsolo. Isto é conseguido com a reversão do ciclo, através de válvulas que são utilizadas para fazer mover o fluido na direção oposta do ciclo (Self *et al*, 2013). Os modos de funcionamento serão explicados em maior detalhe à frente neste capítulo.

Esquema de uma bomba de calor simplificado

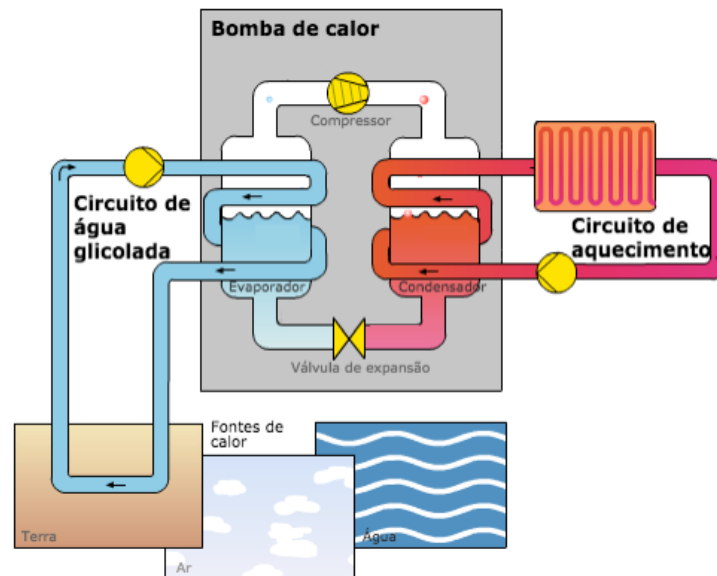


Figura 2 – Esquema de uma bomba de calor (adaptado de Dimplex)

Neste esquema podem ser identificadas as três componentes de um sistema de bomba de calor: Ligação externa à fonte de calor (circuito de água glicolada), bomba de calor e sistema de distribuição (circuito de aquecimento).

Performance

A razão principal pelo interesse em usar bombas de calor para o aquecimento e arrefecimento é porque utilizam menos trabalho para mover o calor entre fontes. Em outras palavras a potência requerida é notoriamente menor que o aquecimento/arrefecimento entregue (Rees, 2016).

Normalmente a eficiência energética é definida em forma de rácio, em forma de percentagem, quantificando a quantidade de energia entregue por quantidade de energia utilizada. Na situação das bombas de calor, este rácio seria superior a 100%. Para evitar este desconforto, nas bombas de calor é utilizado o coeficiente de performance (COP) (Self *et al*, 2013). Em aquecimento o COP é calculado através da equação 3.1:

$$COP = \frac{Q_H}{W} \quad (3.1)$$

Onde,

Q_H – Quantidade de calor entregue
 W - Trabalho requerido
 COP – Coeficiente de performance

O valor máximo deste coeficiente (eficiência de Carnot) é limitado pelas temperaturas da fonte fria (T_C) e quente (T_H). Em aquecimento o limite superior é dado por $COP_{max} = T_H / (T_H - T_C)$. Isto implica que quanto menor for a diferença entre as fontes maior é a eficiência. Sendo esta a razão que torna a geotermia e as suas condições tão interessantes (Rees, 2016).

O COP relativamente alto que é conseguido com as bombas de calor geotérmicas significa que a energia consumida é efetivamente alavancada para que maiores quantidades de aquecimento/arrefecimento sejam entregues (Rees, 2016). Os COPs para bombas de calor geotérmica variam geralmente, entre 3 e 6, estando estes valores dependentes das configurações e tamanho do sistema, das características do subsolo, condições climáticas e outras características (Self *et al*, 2013).

Como a performance está dependente da diferença de temperaturas é comum usar-se uma média pesada dos valores de COP registados em diferentes condições operacionais. O cálculo e definição destes índices podem diferir de região para região, pelo que é requerida alguma precaução na interpretação dos dados dos fabricantes. Para efeitos comparativos o fator de performance sazonal (SPF) é uma métrica que pode ser aplicada tanto para aquecimento como arrefecimento. Este fator está dependente dos componentes do sistema que estão a ser considerados no cálculo. Numa tentativa de se chegar a um consenso e clarificar a definição de que componentes se está a considerar, o projeto europeu SEPEMO estabeleceu as fronteiras (Rees, 2016). Este fator de performance sazonal dos sistemas de bombas de calor varia significativamente dependendo de uma variedade de parâmetros, como, o clima local, o modo operativo, o período em funcionamento, as necessidades do edifício e os sistema de distribuição (radiadores, piso radiante etc...). No caso das bombas de calor geotérmicas (GSHP) outros fatores devem também ser tidos em conta, como: o tipo de subsolo, a profundidade, a condutividade térmica (da argamassa), a resistência térmica, a taxa de troca de calor, entre outros (Carvalho *et al*, 2015).

As RES são recursos limitados quando considerados na provisão das necessidades de aquecimento, como é o caso da energia solar, que está fortemente dependente de fatores externos, pelo que as bombas de calor podem ser vistas como um mecanismo valioso para alavancar a capacidade disponível gerada pelas anteriores (Rees, 2016).

3.1.2 Ligação à terra

Fontes de calor

Há um vasto número de tipos de fontes de calor diferentes que podem ser utilizados com as bombas de calor na climatização de edifícios. Trabalhos antigos sugeriram e testaram diferentes fontes, desde águas correntes, paradas, ar ambiente, entre outros (Rees, 2016).

Extrair e rejeitar o calor para o ar ambiente parece ser uma abordagem óbvia e é possível utilizando uma bomba de calor aerotérmica (ASHP). O ar ambiente é uma fonte atrativa cujos permutadores de calor são compactos e com uma baixa resistência térmica. Estes sistemas podem ser relativamente económicos em termos de custos de investimento. Porém, as temperaturas do ar ambiente são voláteis e têm a desvantagem de ser húmido com a consequência de poder congelar ocasionalmente o permutador de calor exterior, quando houverem picos de necessidade. O que requer um processo que reverta estas situações e permita o descongelamento e o normal funcionamento novamente. Em climas quentes há também a preocupação de que a performance da bomba de calor baixe drasticamente - exatamente quando a potência máxima é requerida (Rees, 2016).

Quando a fonte é o subsolo (subsolo/água) há a vantagem, comparativamente ao ar, de ter uma maior capacidade térmica e consequentemente a sua temperatura ser menos volátil. Sendo esta temperatura mais próxima da pretendida para o ambiente a climatizar. Esta proximidade permite, como visto anteriormente na eficiência de Carnot, maior eficiência (Rees, 2016). As GSHPs tiram partido das temperaturas constantes do subsolo, que são mais mornas no verão que no ar e mais quentes no inverno. Quando a variação da diferença entre o interior e o exterior é elevada, como pode acontecer com um sistema ASHP, é requerido mais

trabalho para fornecer o mesmo grau de aquecimento, o que reduz o COP. Caso a diferença seja excessiva, o sistema pode não funcionar como desejado (Self *et al*, 2013).

Fontes de água-corrente livre, utilizando a própria água como fluido de trabalho, não são tão influenciadas a longo-prazo pelas trocas de calor, sendo por isso atrativas. O que justifica os primeiros trabalhos e exemplos de aplicações de bombas de calor para a climatização conhecidos. Sendo que esta fonte não está sempre acessível, pelo que existem outras formas que utilizam um fluido anticongelante que circula num sistema fechado de tubos no subsolo (Rees, 2016).

A volatilidade de temperaturas de utilizar o subsolo em oposição ao ar ambiente, confere uma enorme vantagem aos sistemas GSHP. A média de temperaturas do subsolo é geralmente mais próxima da do edifício, isto possibilita vantagens termodinâmicas e melhores eficiências operacionais (Rees, 2016).

Apesar dos custos de investimento não serem sempre favoráveis, os custos operacionais resultam geralmente em *life-cycle costs* (custos de ciclo de vida) aceitáveis e poupanças nas emissões de CO₂. Essencialmente, os sistemas GSHP são uma das formas mais eficientes de aquecimento que podem ser concebidas e é fácil perceber o crescente interesse pela tecnologia no início do séc. 20, sendo expectável que este crescimento persista (Rees, 2016).

Atualmente, são utilizados dois tipos básicos de GSHP para soluções residenciais: sistemas água-ar e água-água. Ambos os sistemas utilizam uma das diferentes variações de sistemas para permutar o calor com água ou ar. Os sistemas água-ar são usados para aquecer ou arrefecer ar que é distribuído através de sistemas tradicionais de condutas para espaços condicionados. As unidades água-água, por outro lado, produzem águas quentes que podem ser utilizadas nos sistemas de distribuição, produção de AQS, piscinas, entre outros. As bombas de calor geotérmicas podem também ser divididas de acordo com a configuração do circuito do permutador de calor no subsolo. Existem fundamentalmente dois sistemas, o circuito aberto e o fechado (Swenka, 2008).

Circuito aberto

Os sistemas de GSHP abertos, utilizam água superficial ou subterrânea, que é bombada e injetada através de furos de água. A Figura 3 mostra alguns exemplos de sistemas de circuitos abertos comumente utilizados. A água extraída depois de passar pelo permutador da bomba é libertada de novo na fonte, ou noutro local, podendo ser usada para outros fins como a rega.



Figura 3 – Configurações de circuito aberto (adaptado de Swenka, 2008)

Embora estes sistemas tenham, tipicamente, custos de instalação menores, é relevante ter em atenção a qualidade da água e a manutenção do sistema a longo-prazo (Swenka, 2008).

Circuito Fechado

No caso dos sistemas fechados, o refrigerante que percorre o subsolo, não tem contato direto com este, pois a transferência é feita através do material do tubo. Estes sistemas podem ser verticais (com sondas geotérmicas instaladas no interior de perfurações verticais com profundidades entre os 80 e os 200 m), ou horizontais (no caso de sondas geotérmicas enterradas a pouca profundidade entre os 0,5 e os 2 m, em disposição de laço ou de espiral ou nas fundações dos edifícios (Madureira, 2013)). As Figuras 4 e 5 mostram alguns exemplos de sistemas fechados horizontais e verticais respetivamente.

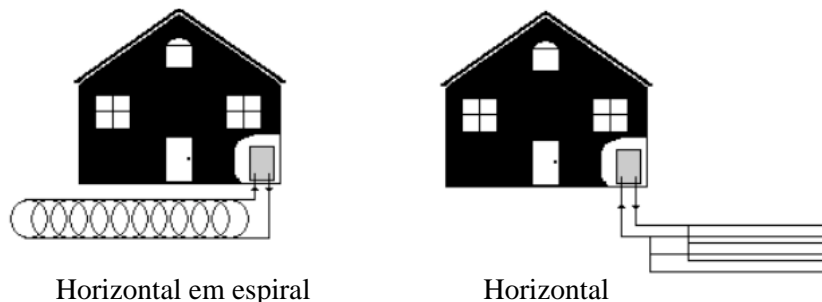


Figura 4 – Configurações de circuito fechado horizontais (adaptado de Swenka, 2008)

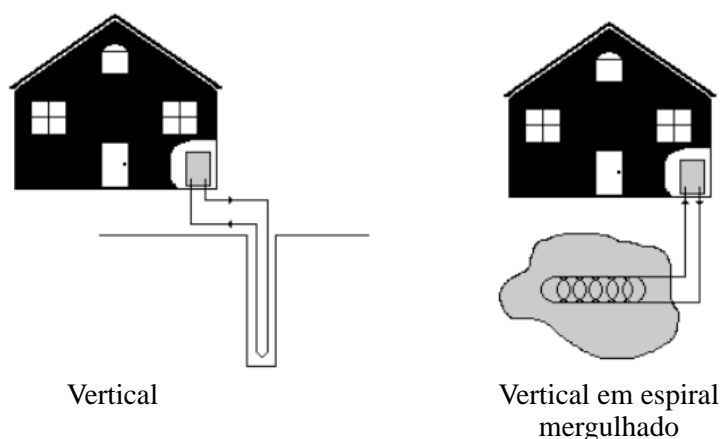


Figura 5 – Configurações de circuito fechado verticais (adaptado de Swenka, 2008)

Instalações em circuito fechado são as mais comuns. O tipo de instalação, bem como a profundidade/extensão é definido pelas condições do terreno e pelas necessidades que se pretendem suprir.

Instalações horizontais necessitam de uma área significativa (entre 1,5 a 2 vezes a área a climatizar (Ferreira, 2014)) e na superfície em cima dos permutadores não podem ter plantas ou qualquer outro tipo de vegetação que possa fazer sombra. O calor captado neste tipo de sistemas por estes permutadores é, sobretudo, fornecido pelo sol e pela chuva. Portanto, devem ser colocados em zonas onde o sol e a chuva possam chegar sem impedimentos. Para tal, a superfície sob a qual se desenvolvem, não deve ficar coberta com construções ou outro tipo de obstáculos (Caleffi, 2011).

Sistemas verticais são concebidos com tubos instalados na vertical até uma profundidade de 100-120 m, mas podem descer também abaixo dos 200 m, pelo que não necessitam de muita área disponível, o que diminui o impacto paisagístico da obra. Com a profundidade aumenta o rendimento térmico das sondas, já que abaixo dos 20 m (devido ao efeito do calor produzido pela terra) a temperatura do subsolo cresce cerca de 3°C a cada 100 m (Caleffi, 2011). Previamente deve ser feito um estudo geológico do terreno. A profundidade e o número de furos são calculados tendo em conta a potência térmica predominante no edifício e condições geológicas do terreno. A distância mínima entre furos deve ser entre 6 a 8m, para evitar

interações indesejadas. Após a realização da furação com auxílio de uma máquina perfuradora, são colocadas as sondas geotérmicas e feito o enchimento com betonite para aumentar as trocas de calor. As sondas são cheias com água glicolada (30% glicol) para evitar que esta congele (Ferreira, 2014). Há uma diversa variedade de configurações de sondas geotérmicas, sendo os mais comuns em forma de “U”, duplo “U” ou coaxial. A principal desvantagem dos sistemas verticais são os custos de instalação, uma vez que a furação é normalmente mais cara que a escavação para as instalações horizontais. Consequentemente, os sistemas verticais são mais económicos para aplicações maiores, cujos custos operacionais abatem mais rapidamente o investimento inicial (Self *et al*, 2013).

3.1.3 Sistemas de distribuição

O sistema de distribuição transfere o calor que é fornecido pela bomba de calor para dentro do edifício. Como mencionado anteriormente, nos sistemas GSHP existem dois tipos de sistemas possíveis de distribuição: água-ar ou água-água. Nos sistemas água-ar a carga térmica é transferida do subsolo para o ar. Este ar é usado como meio de transporte dentro do espaço a aquecer. Neste tipo de sistema o ar é aquecido ao passar através de uma bobina no condensador da bomba e distribuído no edifício através de um sistema de condutas e ventiladores. No caso dos sistemas água-água, usam a água ou outro fluido como meio de transferência no espaço a aquecer. O sistema bombeia água através do condensador da bomba extraindo calor, aquecendo a água. Em seguida a água é bombeada pelo edifício, de acordo com a finalidade pretendida. Esta água pode ser usada em radiadores, piso radiante ou ventilo-convetores. Este tipo de sistemas aquecem usando temperaturas relativamente mais baixas que os convencionais de ar (Self *et al*, 2013). Como demonstrado anteriormente, o rendimento das bombas de calor aumenta com a diminuição da diferença de temperatura entre fontes. Portanto, é conveniente aquecer com temperaturas baixas (Caleffi, 2009).

Como sistemas de distribuição, temos:

- Instalações de piso radiante: consiste em fazer circular água através de um circuito de tubos no pavimento do local que se pretende climatizar. Funcionam a baixas temperaturas. Permite aquecer e arrefecer o espaço (Caleffi, 2009). Devido ao fluxo do calor e à inexistência de deslocação de massas de ar, para além de ser mais higiénico, um espaço com piso radiante consegue atingir uma temperatura mais uniforme do chão ao teto e requererá temperaturas operacionais mais baixas (Self *et al*, 2013).
- Instalações com radiadores: só permitem aquecer e funcionam, geralmente, a temperaturas mais elevadas que as outras soluções, pelo que diminui o rendimento da do sistema. É possível utiliza-los a temperaturas mais baixas, mas é necessário sobre dimensioná-los, ocupando mais espaço (Caleffi, 2009).
- Instalações com ventilo-convetores: são instalados no espaço a climatizar, junto ao teto, junto ao pavimento ou, até mesmo em tetos falsos. Opera com transferência de massas de ar que passa nas lâminas do aparelho, onde circula o fluido vindo da bomba, permitindo o aquecimento ou arrefecimento da mesma (Caleffi, 2009).
- Instalações com ar: a bomba de calor geotérmica fornece a água quente que serve para alimentar uma central de tratamento de ar (Caleffi, 2009).

É também possível combinar vários tipos de distribuição, instalando um sistema híbrido, de forma a responder com maior flexibilidade às necessidades pretendidas (Self *et al*, 2013).

Esquemas de funcionamento

As bombas de calor geotérmicas permitem satisfazer as diversas necessidades tanto de climatização (aquecimento e arrefecimento) de espaços como de produção de águas quentes sanitárias. Na Figura 6 estão ilustrados os modos de aquecimento, em cima o modo de aquecimento do espaço e em baixo o modo de aquecimento de águas sanitárias. As bombas de calor geotérmicas têm ainda a vantagem de fornecer arrefecimento passivo, não necessitando de ter a bomba a trabalhar. Para baixar a temperatura do fluido que serve os terminais, é diretamente utilizado (com um permutador entreposto) o fluido geotérmico. Isto, permite um arrefecimento mais ecológico e económico. Na Figura 7 estão ilustrados os modos de arrefecimento, em cima arrefecimento do espaço com aquecimento de águas quentes sanitárias em simultâneo e em baixo o arrefecimento passivo (bomba desligada).

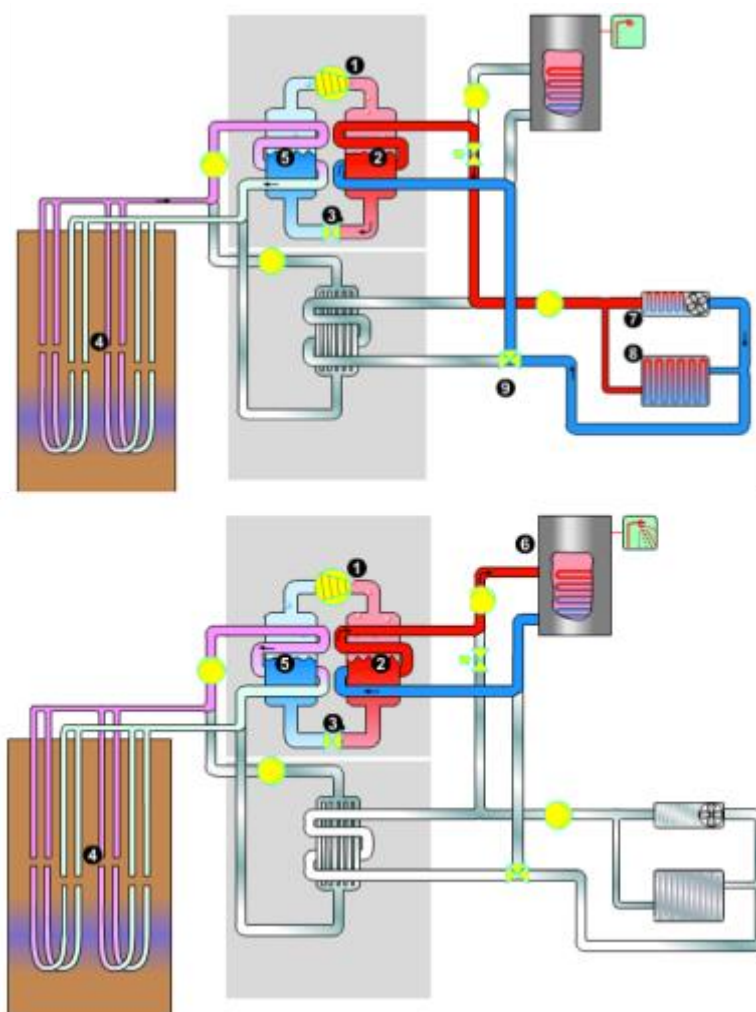


Figura 6 – Esquema de funcionamento no modo de aquecimento (adaptado de Dimplex)

Legenda da Figura 6 (Dimplex):

1. O compressor faz com que o fluido frigorífico que circula no circuito fechado da bomba atinja temperaturas e pressões elevadas;
2. No condensador, o calor é transferido para o aquecimento central. O fluido frigorífico arrefece e liquefaz-se;
3. Na válvula de expansão, o líquido frigorífico expande (queda de pressão) e arrefece;
4. As sondas geotérmicas permitem aproveitar o calor constante do subsolo. Captam essa carga térmica e a transmitem à bomba;

5. No evaporador, a energia captada pela sonda geotérmica é transferida para o fluido frigorífico. Este aquece e evapora;
6. Na produção de águas quentes sanitárias (AQS), o aquecimento central é desligado pela paragem do seu electrocircular e entra em funcionamento o electrocircular das águas quentes sanitárias;
7. No caso de serem utilizados ventilo-convetores como sistemas de distribuição, estes ao serem percorridos por água quente, enviam, através do seu ventilador, ar quente para o meio ambiente;
8. Com um sistema de piso radiante, como explicado antes, a água quente ao circular no seu circuito, fornece um aquecimento suave, uniforme e homogéneo;
9. No modo de aquecimento, as válvulas comutadoras bloqueiam o permutador de calor para o arrefecimento passivo.

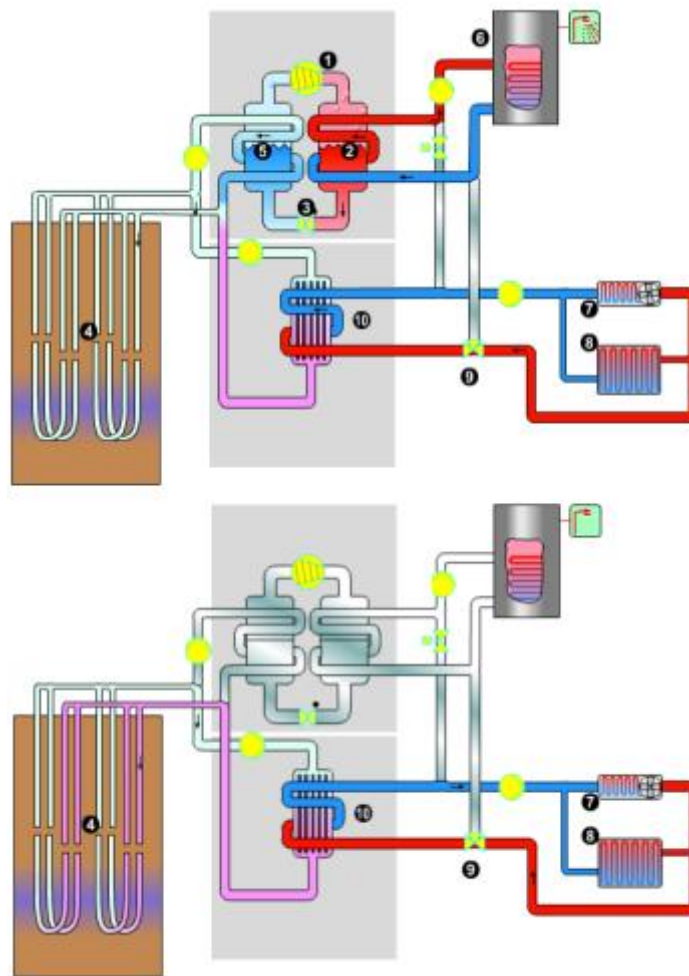


Figura 7 – Esquema de funcionamento no modo de arrefecimento (adaptado de Dimplex)

Legenda da Figura 7 (Dimplex):

1. O compressor faz com que o fluido frigorífico, que circula em circuito fechado, atinja pressão e temperatura elevadas;
2. No condensador o calor é transferido para o aquecimento central. O fluido frigorífico arrefece e liquefaz-se;
3. O fluido frigorífico passa pela válvula de expansão e expande, diminuindo a sua pressão e arrefece;

4. As sondas geotérmicas permitem aproveitar o calor constante do subsolo, para a produção de águas quentes sanitárias e como fonte de frio para o arrefecimento passivo;
5. No evaporador, a energia captada pela sonda geotérmica é transferida para o fluido frigorífico. Este aquece e evapora-se;
6. Para a operação paralela do aquecimento central da água e do arrefecimento passivo, os dois sistemas são separados hidraulicamente por válvulas comutadoras;
7. A água fria ao circular pelo ventilo-convetor permite enviar, através do seu ventilador, para o ar ambiente uma frescura agradável arrefecendo o espaço;
8. O piso radiante funciona como um permutador de calor. A água arrefecida ao circular no seu circuito, como esta está a uma temperatura inferior, retira o calor do espaço ambiente. Permitindo um arrefecimento suave e agradável;
9. As válvulas comutadoras conduzem a água do circuito de distribuição (circuito de aquecimento) através do permutador passivo de calor e arrefecem-na;
10. Ativando a bomba de circulação/arrefecimento de água glicolada, a energia da água do sistema de distribuição (circuito de aquecimento) é transferida para o circuito da água glicolada dentro do permutador de calor. Posteriormente, este calor é dissipado no subsolo.

3.2 Mercado

O interesse internacional na aplicação de GSHP foi despertado após a crise energética dos anos 70. No final dos anos 70 e 80 a investigação cresceu, tanto na América do Norte como na Europa, sendo na Europa essencialmente países Escandinavos e Suíça. Os desenvolvimentos do mercado de ar-condicionado, bem como da refrigeração de alimentos, possibilitaram avanços tecnológicos dos compressores assim como preços mais competitivos. A disponibilidade de canalizações em plástico a um preço mais económico, permitiu também a minimização do risco associado à circulação do refrigerante em tubos de metal subterrados. Pelo que, consequentemente, possibilitou avanços nas bombas de calor e nos sistemas nos anos 80. Houve então um crescimento constante da tecnologia GSHP nos Estados Unidos da América, Suécia e Suíça, seguido pela Alemanha e Áustria. Estes desenvolvimentos e crescimento do número de implementações nestes países validam de certa forma a utilização em aplicações residenciais na viragem do século (Rees, 2016).

Até ao início do ano de 2000, foi reportada uma estimativa de 400 mil instalações nos EUA, 55 mil na Suécia, 30 mil no Canadá, 24 mil na Suíça, 19 mil na Áustria e 18 mil na Alemanha. É de notar que a esta altura não foi reportada nenhuma instalação na China e que noutros 19 países reportados, o número era relativamente baixo. O número de instalações no ano de 2000 cresceu rapidamente sendo reportadas 40 000 novas instalações nos EUA, perfazendo um crescimento anual de 10% (Rees, 2016).

Os dados reportados em 2015, permitem perceber as diversas mudanças relativamente à situação reportada em 2000. Esta mudança beneficiou das políticas energéticas Europeias e do crescimento económico significativo da China na última década.

As sondagens a nível mundial acerca do desenvolvimento das bombas de calor geotérmicas são reportadas a cada 5 anos desde 1975. E no seguimento da introdução das diretivas RES na Europa, a informação dos Estados Membros da União Europeia é reportada anualmente na agência Eurostat e publicados pelo EurObserv'ER, o que permite perceber com maior detalhe o estado atual da tecnologia.

Os dados do Congresso Mundial de Geotermia realizado em 2015 e do EurObserv'ER para a mesma data, mostram claramente um crescimento comparativamente ao ano de 2000. 1,4M de instalações foram reportadas em 2015 nos EUA, o que o coloca na primeira posição. Em segundo vem a China com 981 667 instalações, revelando um crescimento dramático desde 2000. França é outro país que demonstrou também um crescimento significativo. Estes dados podem ser consultados na Figura 8.

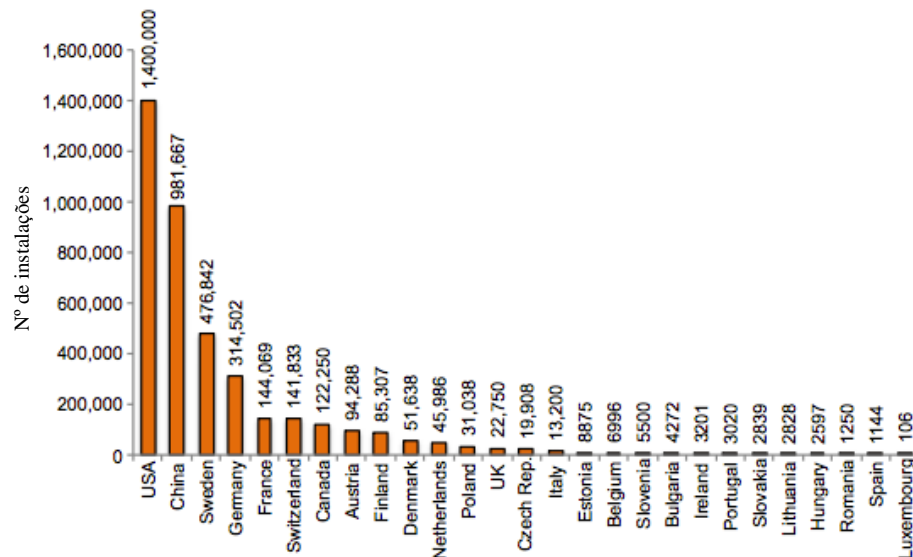


Figura 8 – Número de instalações de sistemas GSHP em 2015 (Rees, 2016)

Quando normalizados os dados, comparando o número de instalações per capita, percebemos melhor a penetração da tecnologia nestes países. Estes dados estão representados na Figura 9. Como esperado os países Escandinavos e Suíça estavam nos lugares cimeiros devido a terem sido pioneiros e ao seu clima frio. A Dinamarca, tem um clima mais temperado que os Escandinavos e também está nas posições dianteiras, o que demonstra que há potencial de integração da tecnologia em outros países de clima semelhante como Irlanda, Reino Unido e Bélgica. Países do Sul da Europa como Itália, Espanha (e Portugal) têm necessidades um pouco diferentes como a refrigeração. Estes climas têm similaridades com partes dos EUA com grande nível de implementação de GSHP, o que é expectável um crescimento também nestes países (Rees, 2016).

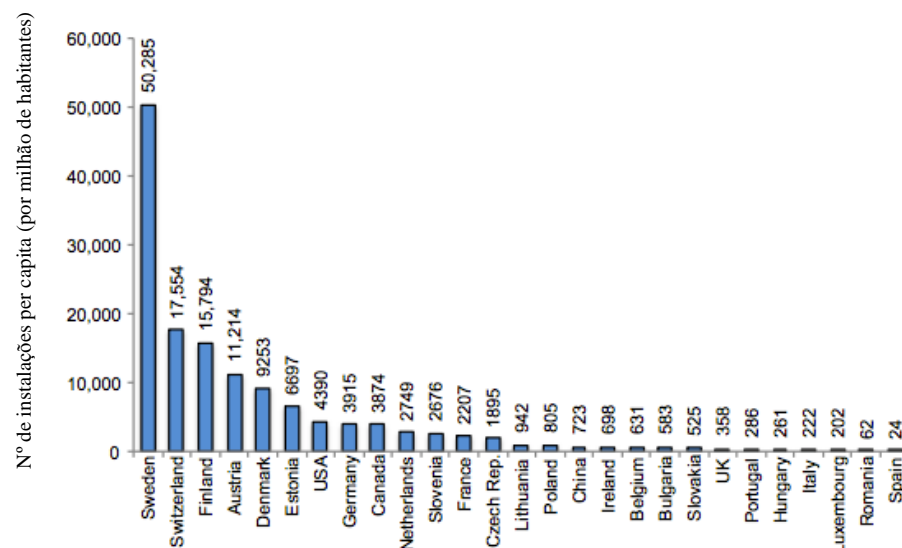


Figura 9 – Número de instalações de GSHP per capita (Milhão de habitantes) em 2015 (Rees, 2016)

Segundo o estudo desenvolvido por GEOTeCH (2016), projeto financiado pela UE ao abrigo do programa 2020, com o objetivo de promover a disseminação da geotermia superficial como solução para o aquecimento e arrefecimento de edifícios na UE, o mercado de climatização na Europa é bastante heterogéneo, composto por diversas tecnologias e caracterizado pelos baixos níveis de eficiência. Existindo, por isso, a oportunidade e necessidade de modernização dos sistemas convencionais existentes. Neste contexto, a exploração de fontes de energia renovável, como a geotermia em particular, possibilita um enorme potencial de poupança energética (até 70%), permitindo atingir as metas europeias tanto energéticas, como de redução nas emissões de carbono. Existem, porém, muitas diferenças entre os vários Estados Membros na exploração desta energia renovável, essencialmente devido à disponibilização de incentivos.

Dados da Conferência Europeia para a Geotermia realizada em setembro de 2016, reportam que em termos de números de instalações, capacidade instalada e energia produzida, a geotermia superficial é de longe o maior setor dos aproveitamentos geotérmicos na Europa (outros setores são o uso direto e a produção de eletricidade). A quota cresceu desde os 63% reportados na conferência de 2013 para os 67% em 2015 (Antics *et al*, 2016). Segundo os dados reportados pelo EurObserv'ER¹, o número de bombas de calor geotérmicas instaladas na União Europeia excedeu as 1,4 Milhões de unidades (EurObserv'ER, 2016). A Suécia é de longe o líder com cerca de 498 mil instalações, sendo ainda mais significativa esta liderança quando considerada per capita, uma vez que tem menos de 10 Milhões de habitantes. A Alemanha vem em segundo lugar com 330 mil instalações (2/3 das da Suécia). Outros países com alguma maturidade temos a França com cerca de 149 mil, Áustria com 96 mil e Finlândia com 95 mil, que representam mais de 80% do total de instalações na UE. Portugal, em 2015 reportou 832 instalações. Estes dados estão apresentados na Tabela 2 (*Nota: os dados da Itália, França, Espanha e Portugal não são diretamente comparáveis a outros, porque incluem as bombas de calor cuja função principal é o arrefecimento).

O número de vendas verificadas em 2015, varia de país para país. As vendas estão apresentadas na Tabela 3. As razões para estas diferenças são múltiplas e podem ser atribuídas a preços da energia, incentivos, regulação, consciencialização, conhecimento e a vendedores e instaladores ativos (Antics *et al*, 2016). Segundo os dados reportados, a Suécia foi o país com maior número de vendas, com um pouco mais de 26 mil unidades vendidas, seguido da Alemanha com 17 mil. Portugal vem na última posição com apenas 59 unidades vendidas (EurObserv'ER, 2016).

¹ De notar que os dados reportados pelo EurObserv'ER diferem um pouco de outras fontes, devido à classificação das bombas de calor. Neste estudo são incluídas as bombas de calor reversíveis que adicionalmente oferecem uma função de arrefecimento, enquanto as bombas de calor reversíveis usadas principalmente para o arrefecimento são apenas incluídas se os sistemas atenderem aos requisitos da Diretiva Europeia. Estando esta inclusão suscetível ao julgamento dos países que reportam as estatísticas.

Tabela 2 – Número total de GSHP em operação na UE em 2015 (EurObserv'ER, 2016)

País	Nº de instalações
Suécia	497 658
Alemanha	330 244
França*	148 675
Áustria	95 860
Finlândia	94 504
Dinamarca	56 023
Holanda	47 407
Polónia	30 255
Reino Unido	27 263
República Checa	21 494
Itália*	14 100
Estónia	10 625
Bélgica	7 774
Eslovénia	5 500
Bulgária	4 272
Lituânia	3 693
Irlanda	3 453
Eslováquia	3 073
Espanha*	1 216
Portugal*	832
Hungria	510
Luxemburgo	420
Total UE	1 404 851

Tabela 3 – Número de unidades de GSHP vendidas na UE em 2015 (EurObserv'ER, 2016)

País	Vendas
Suécia	26 377
Alemanha	17 000
Finlândia	9210
Áustria	5897
Polónia	5567
França	3810
Reino Unido	2388
Holanda	2086
Dinamarca	1885
Estónia	1750
República Checa	1586
Bélgica	1404
Itália	952
Lituânia	785
Bulgária	532
Eslovénia	390
Irlanda	337
Eslováquia	234
Luxemburgo	87
Hungria	85
Espanha	72
Portugal	59
Total UE	82 493

Fatores que influenciam o desenvolvimento dos mercados

São diversos os fatores que afetam a disseminação da tecnologia, estes foram divididos em dois grupos: fatores técnicos e económicos.

Fatores técnicos, nomeadamente a elevada eficiência, favorecem os sistemas GSHP, sendo ainda mais significativos em climas mais frios. Quando não é possível o acesso ao gás natural, as bombas de calor tornam-se uma opção atrativa. Nestas circunstâncias, as bombas de calor aerotérmicas (ASHP) podem ser uma das opções mais económicas. Porém, as dificuldades com o congelamento dos permutadores exteriores e a baixa performance resultante de climas com baixas temperaturas ambiente, tornam as bombas de calor geotérmicas a melhor solução técnica. A tecnologia GSHP, tem ainda a vantagem de ser silenciosa e as instalações entopem-se mais dificilmente comparativamente às bombas de calor aerotérmicas e ao ar-condicionado. Como dificuldades e incertezas temos os furos, mas que geralmente são ultrapassadas pois com a variedade de técnicas de perfuração é possível lidar com a maioria das condições geológicas. O número de furos e a profundidade depende das necessidades da casa (Rees, 2016).

Fatores económicos têm geralmente um impacto significativo na disseminação da tecnologia GSHP. Custos de investimento mais elevados associados à perfuração, permutadores, juntamente com a bomba de calor, tornam este tipo de sistemas menos atrativos quando comparados com sistemas alimentados a combustíveis fósseis. A estimulação pode ser conseguida através de incentivos financeiros. Em geral, os incentivos financeiros mostram ser influenciadores na fase inicial do crescimento (Rees, 2016). Preços dos furos mais competitivos, subsídios para a substituição de equipamentos menos eficientes a combustível fóssil, comparticipação de parte do investimento, impostos sobre a emissão de CO₂ e redução de impostos sobre poupanças de energia, são algumas das medidas, que se verificam em alguns países com forte implementação deste tipo de tecnologia e que permitiriam uma maior disseminação em Portugal. Preços da energia, nomeadamente da eletricidade face ao preço das alternativas, são bastante importantes. Estes preços têm bastante peso nos custos operacionais, pelo que a redução de impostos sobre o preço da eletricidade para utilizadores de bombas de calor, como se verifica na Dinamarca, influenciaria o desenvolvimento do mercado (GEOTeCH, 2016).

Barreiras que abrandam o crescimento e a disseminação da tecnologia

Hughes (2008), no seu estudo realizado nos EUA, inquiriu informalmente diversos stakeholders ligados à exploração de aproveitamentos de geotermia superficial, desde empresas que instalam este tipo de sistemas, até entidades que patrocinaram programas relacionados com a tecnologia, passando por clientes e projetistas. Este inquérito decorreu entre outubro e novembro de 2008. Aos participantes foi-lhes perguntado quais as principais barreiras ao rápido crescimento da indústria GSHP. As respostas foram compiladas numa lista e ordenadas de acordo com a relevância (1 sendo a barreira mais importante):

1. Alto custo inicial dos sistemas GSHP para os clientes;
2. Falta de conhecimento do consumidor e/ou confiança nos benefícios do sistema GSHP;
3. Falta de conhecimento e/ou confiança de autoridades e reguladores nos benefícios do sistema GSHP;
4. Limitações no desenho e modelo de negócio;
5. Limitações da infraestrutura de instalação;
6. Falta de novas tecnologias e técnicas para melhorar os custos e o desempenho do sistema de GSHP.

Ações para ultrapassar barreiras e acelerar a penetração no mercado

Para além das barreiras, Hughes (2008) compilou também numa lista, algumas soluções sugeridas que permitiriam uma maior disseminação da tecnologia (1 sendo a solução mais importante):

1. Dados independentes, estatisticamente validados sobre os custos e benefícios dos sistemas GSHP;
2. Estimativa independente dos benefícios nacionais da implantação agressiva de sistemas GSHP;
3. Programas cooperativos a nível nacional que facilitem o fornecimento de sistemas GSHP;
4. Desenvolvimento e implementação de programas para fornecer acesso universal à tecnologia GSHP;
5. Desenvolvimento de dados, análises e ferramentas que permitam *life-cycle costs* mais baixos;
6. Expansão geográfica de projetistas de alta qualidade;
7. Expansão geográfica de instaladores de alta qualidade.

3.3 Situação em Portugal

Os recursos geotérmicos disponíveis em Portugal são variados, em virtude de uma complexa e diversificada geologia. Existindo uma clara distinção entre os recursos disponíveis no continente e aqueles disponíveis no arquipélago dos Açores (Lourenço e Cruz, 2006).

Existem registos históricos da utilização da água quente natural para balneoterapia, desde o tempo da colonização romana, como comprovado através de alguns vestígios arqueológicos. Os aproveitamentos geotérmicos em Portugal vão desde as altas entalpias, que permitem a produção de energia elétrica (como é o caso no Arquipélago dos Açores, principalmente na ilha de S. Miguel, onde se encontra a funcionar há já vários anos uma central geotérmica), até às muito baixas entalpias disponíveis globalmente, que como explicado anteriormente, podem ser exploradas com o auxílio de bombas de calor geotérmicas. Dadas as possibilidades de utilização deste último tipo de aproveitamento (muito baixa entalpia) e as oportunidades existentes em variados setores, foi criada uma plataforma, no sentido de fomentar um desenvolvimento ordenado e sustentável da exploração dos recursos geotérmicos superficiais de muito baixa entalpia.

No dia 21 de Janeiro de 2013, foi criada a Plataforma Portuguesa da Geotermia Superficial (PPGS), integrada pela Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), Agência de Energia (ADENE), Associação Portuguesa de Geólogos (APG) e o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG). Esta Plataforma tem como objetivo a divulgação e credibilização da GS em Portugal, intervindo nas várias áreas de relevo para o desenvolvimento e implementação da atividade em Portugal, nomeadamente a nível de legislação, informação, disseminação, formação e investigação – Figura 10 (Ramalho *et al*, 2014).

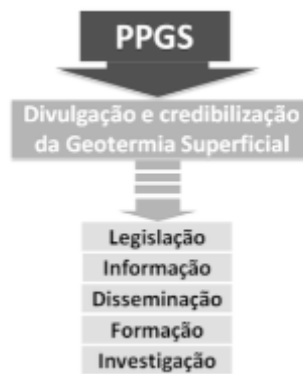


Figura 10 – Áreas de intervenção da PPGS (Ramalho *et al*, 2014)

Para ir ao encontro dos objetivos traçados, a PPGS, criou dois grupos de trabalho: Legislação (coordenado pela DGEG) e Formação (coordenado pelo LNEG) (Ramalho *et al*, 2014).

O Grupo de Trabalho da Legislação tem por objetivo assegurar uma evolução do mercado ordenada e sustentável, através da análise de legislação de outros países europeus, onde este tipo de exploração já se encontra em fase avançada. Como é o caso da França, Suíça, Suécia, e em especial da Alemanha, com o sua normativa VDI4640, sendo necessário verificar se a mesma terá aplicabilidade e adaptação com a realidade de Portugal (Ramalho *et al*, 2014).

Por outro lado, o Grupo de Trabalho da Formação, tem como objetivo a promoção de boas práticas e de uma comunidade geotérmica bem informada com técnicas que assegurem qualidade e sustentabilidade na utilização do recurso, através da formação dos instaladores (Ramalho *et al*, 2014).

Outro foco da plataforma é o desenvolvimento do Atlas Geotérmico Nacional, com informação de carácter diverso e aplicável aos vários tipos de geotermia, acessível aos diversos intervenientes, designadamente projetistas, empresários e investigadores (Ramalho *et al*, 2014).

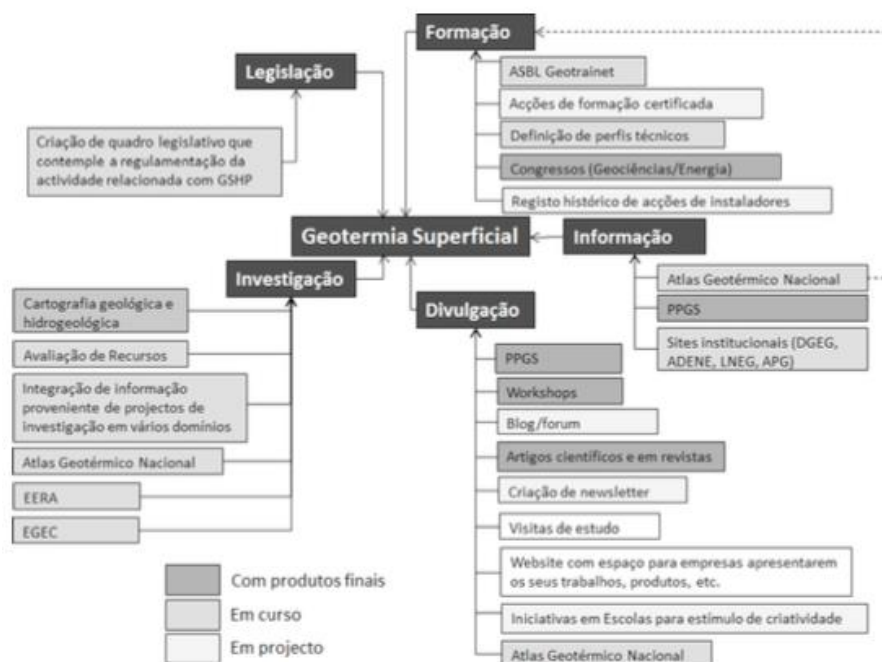


Figura 11 – Ações e iniciativas da PPGS (Ramalho *et al*, 2014)

Para perceber a situação da geotermia superficial e identificar possíveis barreiras e dificuldades na disseminação no mercado português, a PPGS, no IX Congresso Nacional de Geologia realizado em 2014, fez um convite aos participantes a realizar uma análise SWOT (forças, fraquezas, oportunidades e ameaças) sobre a situação em Portugal (Madureira, 2013). Os resultados deste exercício revelam que muitos dos fatores percecionados são universais, pelo que estudar o que outros países fizeram para os resolver, pode fornecer pistas para dinamizar o mercado em Portugal. Os resultados podem ser consultados na Tabela 4.

Em geral, os resultados desta análise coincidiam com aqueles que a PPGS já tinha identificado, nomeadamente a ausência de legislação/regulamentação, a escassa divulgação e a fraca formação do pessoal técnico e das empresas envolvidas.

Tabela 4 – Análise SWOT (Diaz, 2014)

<p style="text-align: center;">Forças</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bom potencial para a satisfação da procura existente em climatização; ▪ Recurso existente e com boa distribuição nacional; ▪ Recurso endógeno renovável; ▪ Recurso sem intermitências; ▪ Baixo OPEX ou custo de manutenção; ▪ Tecnologia das bombas de calor madura, mas também com potencial de inovação; ▪ Baixo impacto ambiental, inclusive ao nível de emissões de CO₂; ▪ Conhecimento e experiência existentes em utilização na balneoterapia, sondagens e captação de águas e bombas de calor; ▪ Fatores hidrogeológicos favoráveis, incluindo a existência de aquíferos superficiais. 	<p style="text-align: center;">Fraquezas</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Pouca experiência/formação de pessoal técnico e empresas; ▪ Elevado CAPEX ou investimento inicial ▪ Falta de casos/estudos pilotos e respetiva monitorização; ▪ Ausência dados estatísticos/históricos; ▪ Recurso energético não exportável; ▪ Escasso conhecimento subsolo; ▪ Pouco replicável devido à heterogeneidade do subsolo; ▪ Problemas esgotamento/arrefecimento no sistema; ▪ Risco de falhanço na execução; ▪ Necessidade de adaptação de equipamentos; ▪ Baixa rentabilidade do sistema.
<p style="text-align: center;">Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Contexto energético e ambiental internacional; ▪ Diminuição da dependência energética; ▪ Redução das emissões de CO₂; ▪ Desenvolvimento da fileira da GS, incluída a formação especializada; ▪ Criação de emprego verde e especializado; ▪ Desenvolvimento de normativa adequada. 	<p style="text-align: center;">Ameaças</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Escassa divulgação das vantagens e desvantagens da GS; ▪ Ausência regulamentação/legislação referente à GS; ▪ Lobbies fortes de outras energias face à quase ausência do lobby da geotermia em Portugal; ▪ Falta de apoio financeiro (fiscal/externo) ▪ Crise financeira; ▪ Risco de maus exemplos; ▪ Ausência estratégia nacional de gestão de recursos internos à médio-longo prazo; ▪ Competitividade de outras energias renováveis em Portugal.

Exemplo de aproveitamento geotermia superficial em Portugal

Portugal reúne as condições geológicas necessárias à instalação da tecnologia. Para além das necessidades de produção de AQS que se precisam durante todo o ano e da necessidade de aquecimento durante a temporada de inverno, Portugal, devido ao seu clima, necessita de refrigeração nos meses mais quentes do verão. Neste sentido, a geotermia apresenta vantagens relativamente a outros sistemas de climatização renováveis, uma vez que é um dos poucos que permite obter arrefecimento, aquecimento e produção de águas quentes sanitárias com a mesma instalação.

Um exemplo duma instalação de GSHP em Portugal, foi realizada em Coimbra, ao abrigo do projeto Europeu GroundMed. Para além de Portugal, a tecnologia foi demonstrada em 8 outros edifícios no clima mediterrâneo. O edifício piloto, é um edifício de 4 pisos com uma área total de 3250 m² e está localizado junto ao Rio Mondego. O sistema GSHP foi concebido e instalado para satisfazer as necessidades térmicas do 2º piso. Este é o piso que apresenta maiores variações térmicas devido à sua ligação ao telhado e devido à grande área de vidro. Este piso tem 22 escritórios e aproximadamente um espaço condicionado com uma área de 600 m². O objetivo deste projeto era demonstrar um Fator de Performance Sazonal (SPF) maior que 5 para as GSHP, tanto em aquecimento como arrefecimento.

Para suprir as necessidades pretendidas, foram realizados 7 furos verticais de 125m cada. A configuração da sonda geotérmica usada foi em duplo “U”. Para o sistema de distribuição foram utilizados ventilo-convetores.

Os resultados obtidos neste caso de estudo experimental, demonstraram os níveis elevados de performance de sistemas GSHP que são possíveis obter, sendo os objetivos superados. Isto mostra que os sistemas GSHP são muito eficientes e que podem ser uma solução adequada para a provisão de aquecimento em edifícios, com o benefício adicional que também pode ser usado para o arrefecimento no verão, pois podem ser usados como sistemas reversíveis (GROUND-MED; Carvalho *et al*, 2015).

3.4 Apresentação desenvolvida

Com vista a permitir à empresa apresentar de melhor maneira esta tecnologia a futuros clientes, foi desenvolvida uma ferramenta que servirá como apresentação técnica. Nesta apresentação foram compilados os aspetos relevantes revistos neste capítulo. Esta ferramenta desenvolvida no *Microsoft PowerPoint*, pretende dar resposta a alguns dos problemas listados. Com esta apresentação e presente trabalho pretende-se credibilizar e aumentar a visibilidade da GS em Portugal. A apresentação pode ser consultada nas Figuras A.1-A.10 do Anexo A.

Na apresentação desenvolvida, para além da explicação técnica dos componentes que compõe o sistema geotérmico e dos modos de funcionamento, são apresentadas algumas das inúmeras vantagens que estes sistemas acarretam e que permitem ao cliente perceber os diferentes benefícios. As vantagens compiladas apresentadas foram:

- Energia renovável e ecológica, devido à reduzida emissão de gases para a atmosfera;
- Eficiente, permitindo poupanças significativas resultantes dos altos níveis de performance conseguidos. Custos operativos mais baixos e menos necessidades de manutenção;
- Versátil, apresenta vantagens relativamente a outros sistemas de climatização renováveis, uma vez que é um dos poucos que permite obter aquecimento, arrefecimento e produção de AQS com a mesma instalação;

- Independente de condições externas, funciona sem intermitências, ao contrário de outras fontes de energia renovável, como a solar e a eólica. É por isso encarada como forma de energia contínua, disponível 24h/dia;
- Energia local, sem preocupações com o reabastecimento, como acontece com algumas soluções;
- Amiga do ambiente e independente da volatilidade e incerteza dos preços dos combustíveis fósseis;
- Longa vida útil, comprovada pelo elevado número de instalações existentes em alguns países;
- Impacto paisagístico reduzido, ao contrário de outros sistemas com instalações exteriores, o sistema de captação encontra-se no subsolo e a bomba de calor acondicionada num espaço reduzido dentro da habitação. Não necessita de chaminé, uma vez que não se geram chamas nem fumos;
- Inexistência de ruídos, como os característicos de outras soluções com ventiladores.

Por fim, a apresentação termina com a análise do estudo de viabilidade financeira do cliente em causa. Este estudo será realizado com recurso à ferramenta de cálculo que será apresentada no capítulo 4.

4 Viabilidade financeira da geotermia

Nos capítulos anteriores foram discutidos aspetos técnicos dos sistemas GSHP, mas a implementação e disseminação desta tecnologia não está só dependente da validade técnica, mas também de um conjunto de outros fatores, entre eles a viabilidade financeira, que tem um peso significativo na decisão final. Na análise da viabilidade financeira aqui realizada, teve-se em conta a existência dos sistemas tradicionais alternativos, com os quais a geotermia é comparada.

Serão inicialmente apresentados os critérios tradicionais utilizados na tomada de decisão financeira de projetos (Valor Atual Líquido, Taxa Interna de Rentabilidade e Período de Recuperação Atualizado) e no âmbito específico de comparação de custos entre soluções energéticas, serão analisados os critérios *Life-Cycle Costs* (LCC) e o Custo Nivelado de Aquecimento e Arrefecimento (LCoHC). De seguida, serão apresentados dois estudos encontrados no âmbito da revisão bibliográfica específica realizada, relativos à viabilidade financeira de sistemas geotérmicos. Por último, faz-se a apresentação e análise dos dois casos de estudo realizados por nós em Portugal, aplicando os critérios financeiros apresentados. Um dos casos diz respeito a uma nova construção onde são apresentadas duas soluções energéticas, e o outro é no âmbito de uma substituição de um sistema avariado.

4.1 Critérios de viabilidade financeira para comparação entre sistemas energéticos

Para uma correta comparação dos fluxos financeiros gerados pelos vários sistemas energéticos alternativos deve ser tido em conta o valor temporal do dinheiro. Para este efeito, os critérios tradicionais de decisão, baseados na atualização dos fluxos, são o Valor Atual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) e o Período de Recuperação Atualizado (PRA).

Valor Atual Líquido (VAL)

No cálculo do valor atual líquido são somados todos os cash flows gerados pelo projeto, atualizados à taxa de custo de capital do projeto e subtraído o cash flow despendido inicialmente (custo de investimento). Se o VAL for positivo, o projeto cria valor, caso seja negativo, ele deve ser rejeitado. Este indicador é sensível à taxa de atualização (desconto) utilizada (Lopes Maria Dulce, 2011).

A formula de cálculo do VAL:

$$VAL = CF_0 + \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r_c)^t} \quad (4.1)$$

Onde,

CF_0 – o cash flow relativo ao custo de investimento inicial previsto (€)
 CF_t – o cash flow esperado no período t (€)
 n – o número de períodos que dura o investimento (anos)
 r_c – a taxa de atualização apropriada ao projeto (%)

Taxa Interna de Rentabilidade (TIR)

A taxa interna de rentabilidade indica a rentabilidade intrínseca do capital investido. Se a TIR for superior à taxa de custo de capital, o projeto cria valor. Quanto maior é a TIR, maior a rentabilidade do projeto. A expressão que determina a taxa de rentabilidade mínima para tornar um projeto viável é calculada pela equação 4.2 (Lopes Maria Dulce, 2011).

$$\sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (4.2)$$

Onde,

CF_t – o cash flow esperado no período t (€)
 n – o número de períodos que dura o investimento (anos)
 TIR – a taxa interna de rentabilidade do projeto (%)
 t – ano t

Período de Recuperação Atualizado (PRA)

O PRA mede o período de tempo que decorre até que os capitais investidos no projeto sejam recuperados, tendo em conta o valor temporal do dinheiro.

A grande falha deste método é a de ignorar por completo os cash flows após a recuperação do investimento. Um projeto pode ter um PRA superior a outro, ou seja, demorar mais tempo a recuperar o seu custo de investimento, mas ter uma rentabilidade superior, se após o período de recuperação registar cash flows bem mais elevados que o outro. (Lopes Maria Dulce, 2011)

O propósito de uma análise económica de projetos, é garantir a melhor alocação de recursos de forma a gerar o maior retorno. Quando os projetos em causa não geram propriamente nenhum benefício sob a forma de entrada de fluxos monetários, a comparação entre alternativas passa por escolher o projeto que requer menos recursos e que produza o mesmo resultado. Tratando-se de uma comparação entre faturas energéticas, cujo diferencial está nos custos para um igual volume de produção, foram usados dois critérios desenvolvidos no âmbito específico de comparação de custos entre sistemas energéticos: o *Life-Cycle Costs* (Custo do Ciclo de Vida, LCC) e o Custo Nivelado de Aquecimento e Arrefecimento (LCoHC).

Life-Cycle Costs (LCC)

O *Life-Cycle cost* ou Custo de Ciclo de Vida (LCC), é a soma de todos os custos associados ao sistema durante o seu tempo de vida, ou para um período de análise, reportados à data de hoje, tendo em conta o valor temporal do dinheiro. Esta análise, tal como nos critérios anteriores, deve ter em conta a inflação quando se estimam as despesas futuras. O sistema com menor LCC é o sistema economicamente mais vantajoso. A diferença entre o LCC de dois sistemas alternativos corresponde ao valor atual dos fluxos diferenciais.

Custo Nivelado de Aquecimento e Arrefecimento (LCoHC)

Numa tentativa de desenvolver estratégias e promover o uso de fontes de energias renováveis nos processos de aquecimento e arrefecimento (RES-HC) na Europa, em 2014, foi criada a iniciativa Fair Renewable Heating and Cooling Options and Trade, FROnT. Apoiada pela Comissão Europeia através do programa Intelligent Energy Europe (IEE), esta iniciativa, propôs o uso do conceito, semelhante ao LCC, conhecido como custo nivelado de aquecimento e arrefecimento – LCoHC. Esta métrica compara o custo constante teórico de gerar 1 kWh de calor / frio durante o tempo de vida da tecnologia de energia renovável (FROnT, 2016).

Como é possível ler no relatório disponibilizado, o cálculo do LCoHC depende da determinação de três parâmetros:

- Geração de calor/frio durante o tempo de vida útil do sistema;
- Gastos totais durante a vida útil do sistema, incluindo custos de investimento, custos de funcionamento, custos de desmantelamento etc.;
- A taxa de desconto.

A Figura 12 representa a conversão calculada (*as entradas de cash flow, quando aplicáveis, incluem apoios, benefícios fiscais, doações, entre outros.).

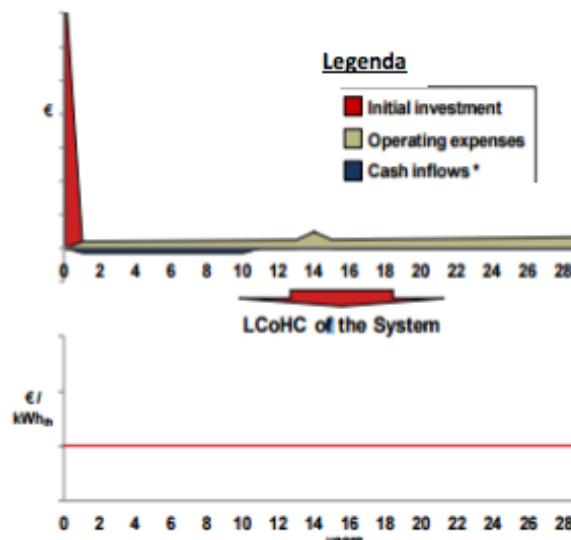


Figura 12 – Ilustração do LCoHC (FROnT, 2016)

Este custo nivelado pode ser calculado pela seguinte formula:

$$LCoHC = \frac{I + \sum_{t=1}^T \frac{C_t - S_t - VR}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (4.3)$$

Onde,

LCoHC – Custo nivelado de aquecimento e arrefecimento (€/KWhth)
 T – Tempo de vida do investimento (anos)
 t – ano t
 Ct – Custos operacionais incorridos no ano t (€)
 VR – Valor Residual (€)
 St – Subsídios ou outros incentivos (€)
 Et – Energia (térmica) gerada no ano t (KWhth)
 I – Investimento Inicial (€)
 r – Taxa de desconto (%)

O cálculo do LCoHC permite a comparação entre as diferentes tecnologias. Quanto menor o LCoHC, mais económica é a tecnologia analisada. Os valores indicados por este custo nivelado refletem o custo em € de gerar um kWh de calor ou de frio com cada um dos sistemas considerados (FROnT, 2016).

O valor residual é calculado quando o horizonte temporal em análise é menor do que o tempo de vida técnica do sistema. Nesse caso, o investidor pode obter uma renda excecional com a venda do sistema. Uma vez que a venda é uma entrada de caixa, ao incluir o valor residual na análise o LCoHC reduz (FROnT, 2016).

4.2 Casos de estudos na literatura

A título de exemplo apresenta-se em seguida as conclusões de dois estudos encontrados no âmbito da revisão literária específica, que demonstraram a viabilidade financeira de sistemas GSHP.

Self *et al* (2013) comparou sistemas de GSHP com outros sistemas convencionais em termos de custos, emissões de CO₂ e outros parâmetros. A comparação foi feita entre os seguintes sistemas de aquecimento: bombas de calor geotérmicas (GSHP), bombas de calor aerotérmicas (ASHP), aquecedores elétricos e caldeiras a gás (média de alta eficiência). A análise foi feita para três províncias do Canadá (Alberta, Ontário e Nova Scotia) e Europa. Os sistemas de bombas de calor geotérmico têm custos iniciais substancialmente mais elevados do que outros sistemas de aquecimento convencional, isto devido aos custos da bomba e da ligação ao exterior (perfuração, sonda ...). Mas, por outro lado, apresentam custos operacionais baixos resultantes da alta eficiência em que operam. Para a análise foram considerados os custos diferentes da eletricidade e do gás natural. Para comparação foi calculado o valor presente num horizonte temporal de 20 anos e considerado um COP de 4 para o sistema GSHP. Os resultados demonstraram o impacto do preço da eletricidade na análise financeira. Nas províncias onde o preço da eletricidade era maior (Alberta e Nova Scotia), isso permitia maiores poupanças económicas a favor do GSHP sobre ASHP e aquecedores elétricos. Foi também descoberto que quando o custo do gás natural é baixo a diferença entre os custos entre GSHP e as caldeiras a gás é menor. Quando os custos dos combustíveis ou gás natural é baixo, as GSHP, podem não ser a opção mais económica. Em locais onde é pretendido também o arrefecimento, a vantagem económica de sistemas GSHP aumenta, pois é possível realizar o arrefecimento através dele (como referido anteriormente). Enquanto, que os outros sistemas convencionais de aquecimento precisam de equipamentos complementares que façam essa função, como ar-condicionado. Os GSHP evitam este custo. O *payback* situou-se entre os 6 e 20 anos, dependendo dos custos de capital, preços da energia e aumentos no preço. Outra vantagem identificada pelos autores, ainda que não quantificada no estudo, tem a ver com a tendência de os sistemas GSHP aumentarem o valor da propriedade. Os autores notaram também que estes sistemas são mais rentáveis em termos de custos quando instalados durante a construção do edifício ou quando é necessário substituir o sistema de aquecimento antigo. A compra e instalação de GSHP para substituir um sistema em funcionamento é raramente vantajoso do ponto de vista energético e económico. Na Europa foi feito um estudo numa perspetiva mais generalizada que o realizado no Canadá. Na maioria dos países da Europa as bombas de calor geotérmicas revelaram-se economicamente vantajosas em comparação com os outros sistemas de aquecimento convencional, devido aos custos elevados de gás natural e eletricidade. Em países da Europa onde o preço da eletricidade era alto comparativamente ao do gás natural, as caldeiras a gás de alta eficiência mostraram ser mais económicas. Nos outros países europeus com menores necessidades de aquecimento as GSHP podem não ser tão económicas, devido aos seus custos de investimento.

Como foi visto e comprovado anteriormente pelos estudos de vários autores relativamente às vantagens dos sistemas GSHP em residências particulares, em obras com necessidades ainda maiores como hotéis, hospitais e escolas, as poupanças adjacentes, justificam ainda mais a implementação desta tecnologia. Nam *et al* (2010), no seguimento de uma normativa coreana que obrigava a instalação de equipamentos renováveis nas escolas, estudou a viabilidade económica de sistemas GSHP. Para esta análise os autores utilizaram o rácio benefício-custo, isto é o valor atual dos benefícios face ao valor atual dos custos – equação 4.4. Valores acima de 1 indicam viabilidade económica. O estudo foi feito para uma escola em específico, comparando o sistema GSHP com soluções pré-existentes.

$$B/C = \frac{\sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+r)^t}} \quad (4.4)$$

Onde,

B/C – Rácio Benefício-Custo
 n – Tempo de vida do investimento (anos)
 t – Ano t
 Bt – Benefício ocorrido t anos após o projeto ter começado
 Ct – Custo ocorrido t anos após o projeto ter começado
 r – Taxa de desconto (%)

O sistema GSHP mostrou poupanças médias mensais significativas, nomeadamente, 3,6 e 2,5 vezes mais económico que o querosene e o gás respetivamente. Em relação ao rácio benefício-custo, o sistema GSHP, quando participado (com apoio de 50% do governo) foi de 1,325 com uma taxa de desconto de 5% e 1,192 com uma de 7%. Revelando viabilidade. Contudo, sem introdução de apoios do governo o rácio benefício-custo ficou abaixo da unidade.

4.3 Casos de estudo analisados

Face à necessidade de responder com argumentos financeiros à barreira do elevado investimento inicial, foi estudada a viabilidade financeira de dois casos em Portugal, aplicando os critérios financeiros apresentados. Com estes casos de estudo, pretende-se comprovar que os altos custos de investimento, não inviabilizam necessariamente este tipo de sistemas. Pretende-se demonstrar que os custos de ciclo vida num horizonte temporal relativamente curto, podem revelar-se menores face a outras soluções alternativas. Neste âmbito, foram estudados dois casos; um caso de uma nova construção onde são apresentadas duas soluções energéticas, e outro de uma substituição de um sistema existente que se encontrava avariado. Para esta análise, foram estimados os diferentes custos e apresentado um mapa de cash flows dos custos das alternativas sugeridas. Estes estudos estão na base da ferramenta de cálculo desenvolvida (em *Microsoft Excel*), que poderá ser usada pela empresa para casos futuros.

Pressupostos e metodologia

A análise foi feita no sistema de preços constantes, sendo os fluxos atualizados a taxas reais. A taxa de inflação considerada foi de 1,5%, no seguimento das projeções divulgadas pelo Banco de Portugal (BdP, 2016).

Quanto à taxa utilizada na atualização dos cash flows, ela terá de ser vista do ponto de vista do custo de capital para o utilizador dos sistemas energéticos. Desta forma e dada a influência desta taxa nos resultados, foram simulados três perfis de clientes: A, B e C. O perfil A, representa um cliente que irá pedir um empréstimo para financiar o projeto. O perfil B, corresponde a um cliente cujo custo de oportunidade seria investir em certificados de aforro. E por último, o perfil C, é o de um cliente que aplicaria o capital num investimento com uma maior rentabilidade. O objetivo é perceber a criação de valor resultante da escolha do sistema geotérmico, para cada tipo de perfil de cliente.

No caso do perfil A, a taxa de atualização corresponde à taxa anual real cujo empréstimo foi contraído. Foi utilizada uma taxa anual nominal de 9%, que corresponde à taxa anual real de 7,389%. Para o perfil de consumidor B, foi considerada uma taxa anual real de 0,670%, que corresponde à taxa de juro bruta para novas subscrições e capitalizações de Certificados de Aforro Série D (IGCP, 2017). No caso do consumidor C, foi considerado como custo de oportunidade um investimento com uma taxa anual real de 10%.

Visto que não é possível estimar a duração que o cliente irá manter o sistema implementado, decidiu-se truncar a vida dos projetos em termos de horizonte temporal de análise a 20 anos.

Duração também usada nos estudos apresentados na literatura, conforme visto anteriormente. Caso a vida económica dos sistemas seja superior à analisada, para aplicar este método da vida útil, seria necessário estimar o valor residual do sistema, de forma a ser contemplado no último ano de análise um fluxo de caixa positivo representando uma entrada de dinheiro, resultante da uma possível venda do sistema. É expectável que vários componentes considerados nestes sistemas, tenham uma vida económica superior ao horizonte temporal considerado de 20 anos, mas dadas as dificuldades em estimar este valor residual e adicionar mais incertezas no estudo, decidiu-se não considerar estes valores. Seria necessária uma análise adicional para determinar estes custos, mas consideramos que estes não afetariam significativamente a comparação entre os sistemas.

Uma vez que os sistemas apresentam uma disparidade no capital investido, a comparação entre os dois sistemas não é direta. Para resolver este problema, foi aplicado o método diferencial. Este método consiste em calcular o VAL do projeto diferencial e ver se este é aceitável, isto é, positivo. Caso esta hipótese se confirme, deve-se optar pelo projeto de maior dimensão (Lopes Maria Dulce, 2011).

Dado que nos sistemas apresentados, não é esperado nenhum benefício sob forma de entrada de dinheiro, ou seja, nenhum tipo de apoio ou subsídio, a opção passará por escolher o projeto que menos custos gerará ao longo da vida. Para isso, são calculados os custos de ciclo de vida dos dois sistemas (LCC). Como esperado, a diferença entre os dois LCC dos sistemas alternativos, será igual ao valor atual líquido do projeto diferencial.

Para comparação entre os sistemas alternativos, foi então calculado: o valor atual dos custos de ciclo de vida dos sistemas (LCC), os custos nivelados (LCoHC), o PRA e a TIR do projeto diferencial, num horizonte temporal de 20 anos. Nestes cálculos, foram incluídos os custos de investimento (custos iniciais), os custos anuais (custos de manutenção e operacionais) e os periódicos (custos de substituição de componentes que são expectáveis de avariar).

Posteriormente, foi realizada, para os diferentes perfis de clientes, uma análise de sensibilidade com variadas evoluções dos preços de energia. Esta análise de sensibilidade, foi feita com base nas possíveis variações que podem ser desencadeadas por situações económicas. Variou-se o fator de crescimento anual do preço das fontes de energia em -5%, -2.5%, +2.5% e +5%.

Estrutura de custos

Custos de capital

Os custos de capital de cada sistema incluem mão de obra, acessórios e instalação. Estes custos foram calculados com o apoio de um orçamentista. Na geotermia, estes custos incluem a preparação do local, perfuração, colocação das sondas, compra dos equipamentos e respetiva instalação.

Custos anuais

Os custos anuais contemplam os custos de manutenção e os operacionais. Os custos de manutenção apresentados são valores tabelados realizados pela empresa, e os custos operacionais são calculados de acordo com o preço da fonte de energia, rendimento do sistema e energia gerada. Os coeficientes de performance operacional (COP) e rendimentos dos sistemas analisados foram determinados com a ajuda de um técnico. No caso da caldeira a gásóleo, o custo operacional é dado pela fórmula 4.5:

$$\text{Custo energia térmica} = \frac{\text{Energia gerada} \times \text{Custo combustível}}{\eta_{\text{caldeira}} \times \text{Poder calorífico inferior}} \quad (4.5)$$

No caso da bomba de calor, dado o seu poder de alavancagem de energia, o custo operacional é dado pela fórmula 4.6:

$$\text{Custo energia térmica} = \frac{\text{Energia gerada} \times \text{Custo electricidade}}{\text{COP da bomba}} \quad (4.6)$$

Os preços de energia considerados nos cálculos, assim como o poder calorífico inferior do gasóleo, podem ser consultados na Tabela 5.

Tabela 5 – Preços por kWh das fontes de energia (E.N.M.C.; EDP)

		Preço unidade (c/ IVA)	PCI (MJ/kg)	PCI (kWh/L)	Preço kWh
Gasóleo Aquecimento	Preço p/ Litro	1,065 €/L	42,450226	10,0230814	0,10625 €
Eletricidade (F. Vazio)	Preço kwh	0,1997 €/kWh	-	-	0,1997 €

Estes custos operacionais, são influenciados pelas variações do preço das fontes de energia. Por essa razão e dada a incerteza na previsão de valores futuros, foi realizada uma análise de sensibilidade para este fator.

Nos sistemas onde foram considerados coletores solares, a fração de energia suprida pelo sol, foi calculada com recurso ao software *SolTerm*. Custos mais vestigiais, como o de bombagem, foram desprezados na análise, dada o seu valor insignificante e dificuldade na estimação.

Nos custos de manutenção dos diferentes sistemas, foi assumido um crescimento anual de 1,5% acima da inflação. Para determinar o impacto desta taxa de crescimento na análise, foi repetido o estudo para a situação deste crescimento ser à taxa de inflação e de ser a uma taxa de 3% acima da inflação. O impacto não foi significativo, mantendo-se a análise com 1,5%.

Custos periódicos

Os custos periódicos considerados, são custos estimados de reposição, ou seja, substituição das componentes avariadas. A estimativa foi conseguida, em discussão com técnicos, segundo a sua experiência no terreno. Seria aconselhado a realização de um estudo mais profundo. Mas dadas as limitações temporais do projeto, não foi possível um levantamento mais exato.

4.3.1 Caso de estudo 1

O primeiro caso de estudo, diz respeito a uma vivenda unifamiliar de 160 m² situada em Mora, Alentejo. Os proprietários pretendiam uma solução que satisfizesse as necessidades de climatização (aquecimento e arrefecimento do espaço), produção de AQS e ainda aquecimento de uma piscina exterior nos meses de verão. Tratando-se de uma construção nova e dada a flexibilidade na instalação dos sistemas, foram apresentadas duas soluções de sistemas alternativos, de acordo com o interesse dos proprietários e adaptabilidade. As necessidades energéticas do edifício foram calculadas por um especialista na empresa, atendendo à eficiência energética do edifício, área útil e sistemas de distribuição. Estas necessidades podem ser consultadas na Tabela 6, de acordo com o sistema. Pretende-se aquecer o espaço na temporada de inverno (5 meses) e arrefecer na de verão (4 meses). Nos meses do verão é também requerido aquecer a piscina exterior. A produção de AQS, é calculada para dar resposta às necessidades típicas diárias de 4 pessoas.

Na solução 1 apresentada, denominada a partir de agora por sistema 1, para o aquecimento, foi selecionada uma caldeira de condensação de alta eficiência a gásóleo, como sistema de distribuição, piso radiante quente². O arrefecimento do espaço, é realizado por um sistema de ar condicionado *multi-split*, com 7 unidades interiores e 2 exteriores. A produção de AQS, é feita por 2 coletores solares com o apoio de uma bomba de calor aerotérmica que irá produzir cerca de 22% das necessidades, uma vez que, a fração solar calculada pelo *SolTerm*, foi de cerca de 78%. O aquecimento da piscina é feito com outra bomba de calor aerotérmica dedicada.

A alternativa (sistema 2) é um sistema de bomba de calor geotérmica que irá suprir todas as necessidades da casa, com auxílio de kits integrados. O sistema de distribuição usado nesta opção para a climatização do espaço, é o piso radiante quente e frio². Para a produção de AQS, é utilizado um acumulador integrado na bomba de calor geotérmica e o aquecimento da piscina é conseguido também através de um kit integrado. No modo de arrefecimento, nos cálculos assumiu-se que 80% das necessidades foram supridas de forma passiva, sem trabalho realizado pelo compressor.

Tabela 6 – Necessidades térmicas anuais

	Necessidades anuais (kWh)
Aquecimento	8849
Arrefecimento	Sistema 1 - 16058 Geotermia - 13600
AQS	4569
Piscina	6740

Os custos de investimento foram calculados por um orçamentista. Estes incluem, para além do material, os custos de mão-de-obra, instalação e acessórios, ou seja, chave na mão. A Tabela 7 resume estes custos. Para suprir as necessidades, com o sistema de geotermia, foi realizado um estudo de forma a perceber a profundidade e número de furos necessários. Segundo os cálculos seriam necessários 2 furos de 80m cada. O preço por metro, sem colocação das sondas, situou-se perto dos 21€/m. A diferença entre os custos de investimento dos dois sistemas é de 12 953,13€.

Tabela 7 – Custos de investimento

Sistema 1		Geotermia (sistema 2)	
Caldeira de condensação gásóleo	6 200,00 €	Bomba de calor geotérmica c/ kits integrados	18 383,00 €
Piso radiante Q	3 680,00 €	Furos	3 375,00 €
Ar condicionado	7 370,00 €	Sonda geotérmica	4 760,00 €
KIT Coletor solar + BC	3 685,00 €	Piso radiante QeF	8 710,00 €
Bomba de calor	3 762,00 €		
Total s/IVA	24 697,00 €		35 228,00 €
Total c/ IVA (23%)	30 377,31 €		43 330,44 €

² A distinção entre o piso radiante quente e o piso radiante quente e frio, prende-se na densidade de tubos que percorrem o pavimento. O piso radiante quente e frio, no modo de arrefecimento, para que seja efetivo necessita de maior área de permuta, daí a maior densidade neste tipo de piso.

Na Tabela 8, vêm quantificados os custos utilizados na análise.

Tabela 8 – Estrutura de custos

	Custos de investimento	Custos anuais (ano 1)		Custos periódicos
		Custos operativos	Custos manutenção	
Sistema 1	30 377,30 €	2 454,32 €	619,92 €	4200€ ano 15
Geotermia	43 330,44 €	648,17 €	430,50 €	4000€ ano 20

Para a situação base, considerou-se que os preços das fontes (gasóleo e eletricidade) acompanhariam a inflação durante a vida do projeto. Assumindo estes pressupostos, o sistema geotérmico mostrou ser o sistema com menores custos de ciclo de vida no horizonte temporal de 20 anos. Caso a escolha recaísse no sistema geotérmico, os perfis A, B e C, poupariam respetivamente, 8 271,58€, 25 121,71€ e 4 616,88€, no horizonte temporal de 20 anos, face à escolha do sistema 1. Desta análise determinística, a taxa interna de rentabilidade dos cash flows diferenciais foi de 14,88%, superior às taxas de desconto dos clientes, revelando por isso, poupanças significativas nos três perfis. Sendo a poupança menor no caso do perfil C, como seria de esperar, dada a sua maior taxa de custo de capital. O período de recuperação atualizado foi de 10 anos para o perfil A, 7 no B e 11 no C. Caso a decisão fosse feita com base no custo nivelado, no custo necessário para produzir um kWh térmico, a geotermia também mostra ser a melhor opção para todos os perfis. Estes valores podem ser consultados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados dos critérios financeiro para cada perfil de cliente

Perfil A (7,39%)				Perfil B (0,67%)				Perfil C (10%)			
LCC1	64 171,04 €			LCC1	93 303,47 €			LCC1	58 110,84 €		
LCC2	55 899,45 €			LCC2	68 181,76 €			LCC2	53 493,96 €		
Δ	- 8 271,58 €	-12,89%		Δ	-25 121,71 €	-26,92%		Δ	-4 616,88 €	-7,94%	
LCoHC 1	0,1723€/kWh			LCoHC 1	0,1381€/kWh			LCoHC 1	0,1885€/kWh		
LCoHC 2	0,1611€/kWh			LCoHC 2	0,1082€/kWh			LCoHC 2	0,1861€/kWh		
Δ	-0,0113€/kWh	-6,55%		Δ	-0,0298€/kWh	-21,60%		Δ	-0,0023€/kWh	-1,24%	
PRA	10 anos			PRA	7 anos			PRA	11 anos		

O período de recuperação atualizado, bem como a evolução dos custos de ciclo de vida acumulados de ambos os sistemas, para os diferentes tipos de consumidores, pode ser consultado na Figura 13.

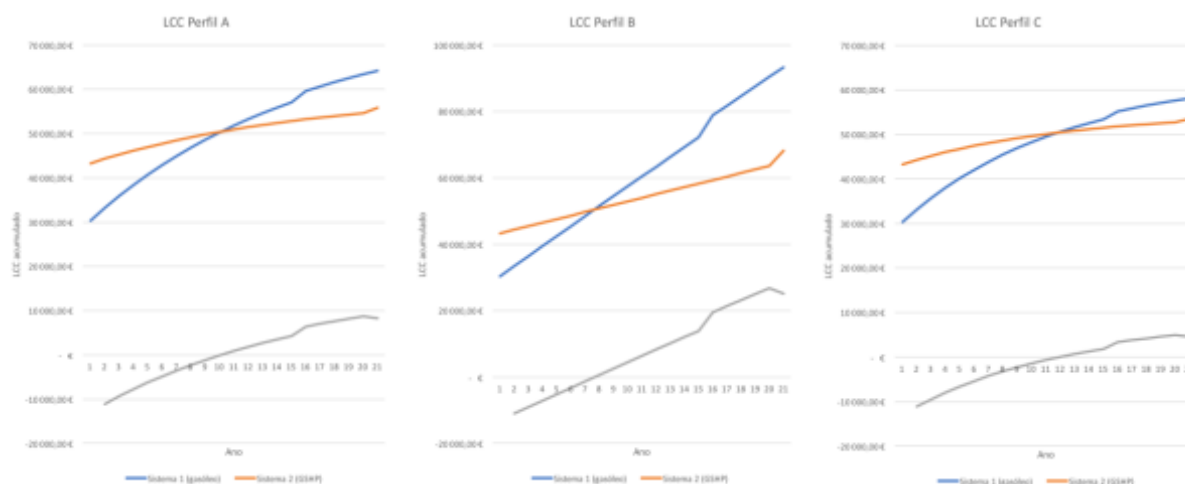


Figura 13 – Custos de ciclo de vida acumulados para cada perfil

Nos diagramas de fluxo de caixa diferenciais, Figura 14, é apresentada a perspetiva de um investidor que instalou um sistema geotérmico. A este respeito, as poupanças obtidas a partir de custos operacionais mais baixos são apresentadas como positivas, ao passo que a diferença entre o custo inicial mais elevado do sistema GSHP e o sistema alternativo é apresentada como negativa.



Figura 14 – Diagramas de fluxos de caixa diferenciais, na perspetiva dos diferentes perfis

Análise de sensibilidade

Com o intuito de perceber o impacto dos preços das energias na decisão final, foi realizada uma análise de sensibilidade com diferentes evoluções do preço das energias contempladas. Foram simulados os parâmetros financeiros para os diferentes perfis de clientes, com evoluções anuais acima e abaixo 2.5% e 5% da inflação.

Os resultados obtidos foram compilados nas Tabelas B.1, B.2 e B.3 do Anexo B. Com letras a vermelho, estão demarcadas as situações cujo custo nivelado obtido não favorece a geotermia.

Em todos os casos, a TIR do projeto diferencial é superior à taxa de desconto dos consumidores. Revelando-se o custo de ciclo de vida da geotermia sempre menor que o do sistema alternativo. A diferença entre os LCC, e a TIR do projeto diferencial aumentam com o aumento de preços, tanto do gásóleo como da eletricidade. De forma contrária, o PRA diminui com o aumento dos preços. Com a diminuição dos preços esta relação mantém-se, diminui a diferença entre os LLC e TIR do projeto diferencial, aumentando o PRA. Estas relações são influenciadas pelo diferencial de consumo energético. Ambos os sistemas consomem eletricidade durante a sua atividade, devido à existência de bombas de calor nas duas soluções, porém, apenas no sistema 1 se verifica o consumo de gásóleo. Ao optar pelo sistema geotérmico face ao sistema 1, são consumidos 3 927 kWh anuais a menos de eletricidade e menos 9 618 kWh de gásóleo. A Figura 15 representa este diferencial resultante da escolha do sistema 2 (geotermia) face ao sistema 1. Estes valores terão um maior impacto, caso futuramente sejam implementados impostos sobre as emissões de CO₂, como se verifica em alguns países. Dado que a combustão de fontes fósseis liberta maiores quantidades de CO₂, a criação deste imposto seria uma das ações que permitiria uma maior disseminação destas tecnologias face aos combustíveis fósseis.

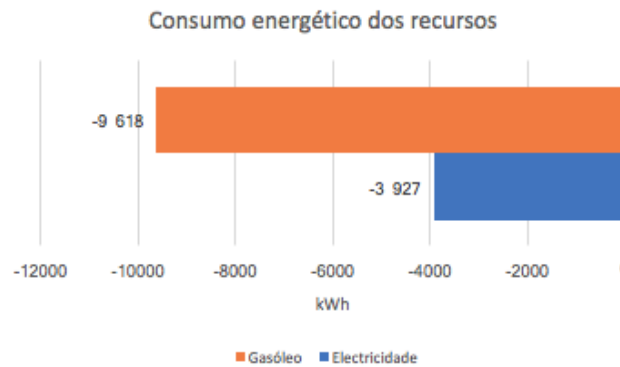


Figura 15 - Variação no consumo energético dos diferentes recursos

Da análise é possível também concluir que alteração do preço do gasóleo tem um impacto maior do que o da eletricidade.

Para o perfil A, a análise dos custos de ciclo de vida demonstra que o sistema geotérmico é o mais favorável. A Tabela B.1 Anexo B apresenta os resultados obtidos. O PRA situa-se entre 13 e 8 anos, sendo que a recuperação mais rápida verifica-se quando o preço tanto da eletricidade como do gasóleo aumentam. Na situação de ambos os preços de combustíveis decrescerem a uma taxa de 5% anuais abaixo da inflação, a diferença entre custos de ciclo de vida é menor, sendo esta de apenas 5,30% a favor do sistema geotérmico. Nesta situação os custos de ciclo de vida atualizados do sistema 1 seriam de 57 041,72€ e do sistema geotérmico 54 016,66€. Uma diferença de 3 025,06€, num horizonte temporal de 20 anos. Os custos nivelados do sistema geotérmico, na mesma situação, seriam 0,0024€/kWh mais altos do que os do sistema alternativo. Quando ambos os preços crescem 5% ao ano sobre a inflação, os custos de ciclo de vida da geotermia são cerca de 17 100€ menores que o sistema alternativo. Com esta variação de preços, o custo de ciclo de vida da geotermia é de 59 066€, ao passo que caso se opte pelo sistema 1, a caldeira a gasóleo, teriam de suportar 76 162€. Os custos nivelados da geotermia mostram poupanças de 16,8%.

Para um cliente com o perfil B, no pior dos cenários contemplados, este poupa 17,2% nos custos de ciclo de vida, 11,17% nos nivelados, caso opte pela geotermia. De uma forma geral, em todos os cenários, todos os indicadores apontam para a geotermia. O período de recuperação situa-se entre os 6 e 8 anos.

Para o perfil C, em todas as simulações os custos de ciclo de vida apontam para a geotermia, porém há situações onde os custos nivelados não chegam a validá-la. De salientar que não foram considerados os valores residuais dos sistemas, o que iria influenciar o cálculo deste indicador. O PRA para este perfil situa-se entre os 9 e 15 anos. Na pior hipótese contemplada, quando ambos os preços decrescem 5%, o consumidor pouparia apenas 1,2% caso optasse pela geotermia. Poupança cerca de 640€ na totalidade do período em análise. Caso os preços crescessem acima da inflação 5%, este consumidor gastaria menos 11 116€, 16% a menos do que iria gastar com a implementação do sistema 1. Os custos de ciclo de vida do sistema geotérmico seriam de 55 826€. Nesta situação, o cliente pouparia cerca de 0,0229€ por cada kWh produzido.

Neste caso de estudo real, de uma forma genérica, a decisão pela geotermia apresenta vantagens. Apesar da diferença de 12 953€ no investimento inicial, em todos os exemplos calculados, os custos de ciclo de vida da geotermia foram menores no horizonte temporal de 20 anos e apenas em algumas situações, sobretudo no perfil C, os custos nivelados apontam o contrário.

4.3.2 Caso de estudo 2

O segundo caso de estudo diz respeito a uma moradia de 400 m² situada em Sta Maria da Feira, Aveiro. A situação é diferente do caso de estudo anterior, na medida em que já existia um sistema instalado que avariou. Para além da caldeira a gásóleo que estava danificada e precisava de ser substituída, o sistema apresentava problemas estruturais que poderiam ser corrigidos, otimizando-o. Com o sistema atual, o proprietário usufruía de aquecimento do espaço durante a temporada de inverno, produção de AQS e de uma piscina interior durante todo o ano. A caldeira a gásóleo estava responsável pelo aquecimento tanto do espaço como da piscina e servia de apoio aos dez coletores solares instalados para produção de AQS.

Na alternativa 1 (sistema 1), é considerada a substituição da caldeira a gásóleo por uma mais eficiente e otimizado o sistema de forma a tirar melhor partido dos coletores solares. Como sistema de distribuição mantêm-se os radiadores. Com a otimização do sistema de coletores solares, e de acordo com o relatório do *SolTerm*, é possível produzir cerca de 97% das necessidades de AQS, com isto, apenas 3% das mesmas serão imputadas ao apoio (caldeira).

O sistema 2, representa a implementação de um sistema de geotermia, que permite responder às diferentes necessidades requisitadas. Seria também possível oferecer a possibilidade de arrefecimento passivo no verão, retirando calor da casa fornecendo-o à piscina, caso o sistema de distribuição fosse adaptado. Porém esta possibilidade não foi contemplada na análise, porque não foi requerido pelo proprietário. Neste sistema manter-se-á o sistema de coletores solares, tirando partido do investimento já realizado. Na produção de AQS o sistema geotérmico servirá de apoio.

As necessidades térmicas foram calculadas por um técnico e apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Necessidades térmicas anuais

	Necessidades anuais (kWh)
Aquecimento	30000
AQS	4376
Piscina	30000

Os custos de investimento foram determinados atendendo às soluções apresentadas. Estes custos incluem todos os custos iniciais necessários. Têm incluídos custos de mão-de-obra, acessórios e instalação finalizada. A Tabela 11 compila estes custos. Para satisfazer as necessidades foi calculada a necessidade de realizar 4 furos de 100m. O custo por metro de furo foi de 21€.

Tabela 11 – Custos de investimento

Sistema 1		Geotermia (sistema 2)	
Caldeira de condensação	12 856,00 €	Bomba de calor geotérmica	25 500,00 €
Otimização do sistema	2 500,00 €	Furos	8 400,00 €
		Sonda	10 115,00 €
Total s/ IVA	15 356,00 €		44 015,00 €
Total c/ IVA (23%)	18 887,88 €		54 138,45 €

A quantificação dos custos encontra-se resumida na tabela 12.

Tabela 12 – Estrutura de custos

	Custos de investimento	Custos anuais (ano 1)		Custos periódicos
		custos operativos	custos manutenção	
Sistema 1	18 887,88 €	7 308,01 €	701,10 €	4000 € ano 10 + 500€ ano 15
Geotermia	54 138,45 €	2 593,80 €	430,50 €	500€ ano 15 + 3000€ ano 20

Apesar da diferença significativa em termos de custos de investimento, no caso base, com o crescimento das fontes de energia (gasóleo e eletricidade) a acompanharem os níveis de inflação, o sistema geotérmico revelou ser a solução mais atrativa, para todos os perfis de clientes. Tanto os custos de ciclo de vida, como os nivelados, são mais baixos na geotermia. A taxa interna de rentabilidade dos cash flows diferenciados foi de 13,40%, superior às taxas de desconto dos diferentes perfis considerados. A poupança conseguida é de 17 563€ para o perfil A, 59 650€ para o B e 8 526€ para o C. O período de recuperação foi de 10, 8 e 12 anos para o perfil A, B e C respetivamente. Tendo em consideração os custos nivelados (€ para produzir um kWh), os perfis A, B e C poupariam em média 11,77%, 29,85% e 4,18% respetivamente por cada kWh produzido. A Tabela 13 mostra os valores obtidos nos diversos critérios utilizados.

Tabela 13 – Resultados dos critérios financeiro para cada perfil de cliente

Perfil A			Perfil B			Perfil C		
LCC1	104 205,57 €		LCC1	174 521,55 €		LCC1	89 363,87 €	
LCC2	86 641,78 €		LCC2	114 871,71 €		LCC2	80 837,26 €	
Δ	-17 563,79 €	-16,85%	Δ	-59 649,83 €	-34,18%	Δ	-8 526,61 €	-9,54%
LC _{CoHC} 1	0,2615€/kWh		LC _{CoHC} 1	0,248€/kWh		LC _{CoHC} 1	0,2676€/kWh	
LC _{CoHC} 2	0,2307€/kWh		LC _{CoHC} 2	0,174€/kWh		LC _{CoHC} 2	0,2564€/kWh	
Δ	-0,0308€/kWh	-11,77%	Δ	-0,074€/kWh	-29,85%	Δ	-0,0112€/kWh	-4,18%
PRA	10 anos		PRA	8 anos		PRA	12 anos	

A evolução dos custos de ciclo de vida acumulados de cada sistema, bem como o momento em que se verifica a recuperação do investimento, estão demonstrados na Figura 16. Nestas evoluções é perceptível o impacto que a taxa de descontos tem na determinação destes custos.

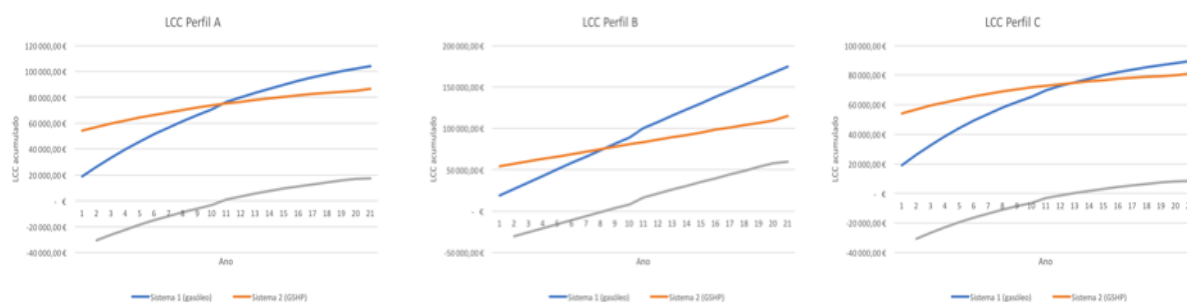


Figura 16 – Custos de ciclo de vida acumulados para cada perfil

Da mesma forma, o diagrama dos cash flows na ótica de cada perfil, mostra a influência das taxas consideradas na atualização dos mesmos, como representado na Figura 17.



Figura 17 – Diagramas de fluxos de caixa diferenciais, na perspetiva dos diferentes perfis

Análise de sensibilidade

Os custos operacionais dos sistemas, são influenciados pela evolução futura dos preços das diferentes fontes de energia que são consumidas. O impacto desta evolução dos preços, está dependente do consumo em termos energéticos que se verifica em cada sistema. Percebendo as dependências das fontes de energia em cada um dos sistemas, é possível prever a evolução dos custos face a diferentes evoluções de preços. Neste caso, o sistema 1, está fortemente dependente dos preços do gasóleo, uma vez que a caldeira de gasóleo desempenha um papel fundamental no suprimento das necessidades. Por outro lado, o sistema 2, está apenas dependente dos preços de eletricidade. A Figura 18 revela a variação no consumo de eletricidade e gasóleo, resultante da escolha do sistema geotérmico face ao sistema 1.

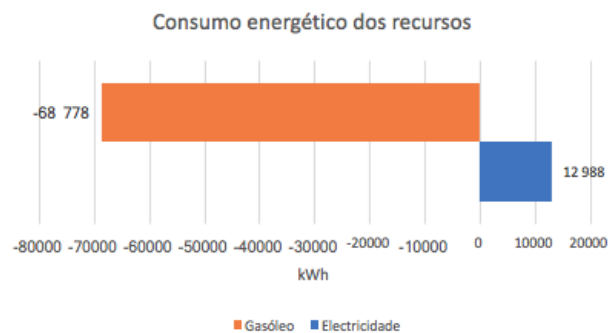


Figura 18 – Variação no consumo energético dos diferentes recursos

Como expectável, dada as proporções no consumo das diferentes fontes, de uma forma generalizada, com o aumento do preço do gasóleo e diminuição do da eletricidade torna a geotermia a solução mais atrativa. Melhorando os indicadores financeiros na generalidade. O impacto da variação do preço do gasóleo é mais significativo que o da eletricidade. Nas Tabelas B.4, B.5 e B.6 do Anexo B, foram compiladas as diversas simulações realizadas para cada perfil de cliente. Com letras a vermelho estão demarcadas as situações em que o custo nivelado obtido não favorece a geotermia, e com fundo cinza estão representadas as situações onde custo de ciclo de vida obtido pela geotermia é superior ao outro sistema. Neste caso de estudo, ao contrário do anterior, houve situações em que os custos de ciclo de vida não favoreciam a geotermia. Por exemplo, no perfil B, quando o preço do gasóleo decresce 5% e o da eletricidade cresce 5% anualmente, a solução geotérmica apresenta custos de ciclo de vida, no horizonte temporal de 20 anos, superiores ao sistema a gasóleo. Recorrendo à curva dos custos de ciclo de vida acumulados é fácil perceber a desvantagem da geotermia nesta

situação. A Figura 21 representa este caso. As curvas de custo de ciclo de vida acumulado nunca se cruzam, em todos os momentos os custos acumulados da geotermia são superiores. Ao fim de 20 anos, o sistema geotérmico revela-se mais caro cerca de 15% (19 021,41€).

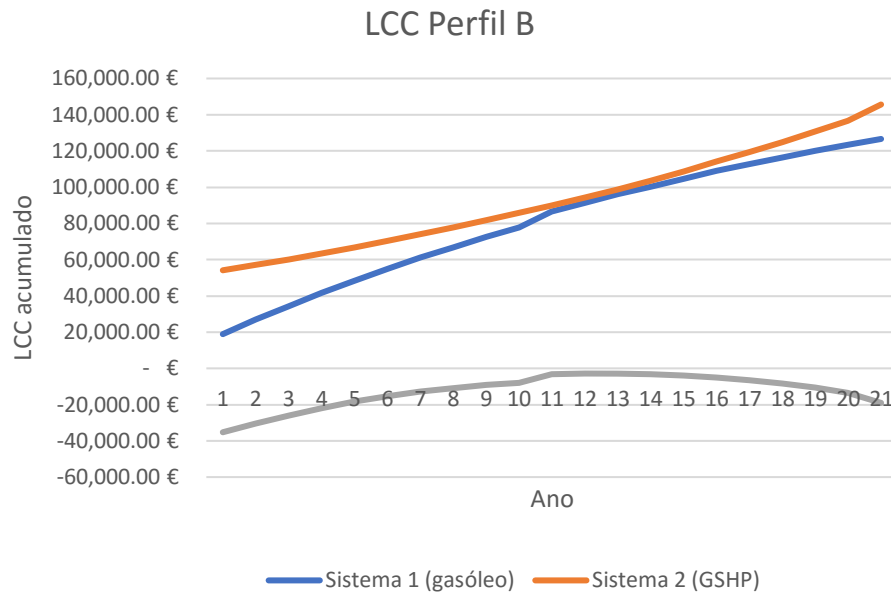


Figura 19 – Evolução dos custos de ciclo de vida acumulados

Para o perfil A, quando o preço do gasóleo decresce anualmente 5% abaixo da inflação e o preço da eletricidade não decresce a pelo menos um ritmo cerca de 2,5% abaixo também, os custos ciclo de vida para 20 anos não viabilizam financeiramente a geotermia. O mesmo acontece quando o preço do gasóleo decresce 2,5% e o da eletricidade cresce acima 2,5%. Isto revela que quando o preço do gasóleo decresce é necessário um estudo mais sensível para determinar qual o decréscimo necessário no preço da eletricidade que viabiliza a geotermia em termos financeiros. Situação idêntica caso a decisão seja tendo em conta os custos nivelados. Nas Tabelas B.4, B.5 e B.6 do Anexo B estão representados estes dados. Como previsto anteriormente, quando o preço do gasóleo cresce anualmente a um ritmo 5% acima e o da eletricidade decresce 5% abaixo da inflação, é quando os indicadores mais favorecem a geotermia, dentro da análise efetuada. Nesta situação, a escolha do sistema geotérmico face ao outro sugerido, revela poupanças nos custos de ciclo de vida na ordem dos 43% ao longo dos 20 anos analisados (-60 803€). O período de recuperação seria de 8 anos e neste cenário o custo nivelado também apoiaria a geotermia, mostrando custos de menos 40,00% por cada kWh produzidos neste período.

No caso do perfil B, quando os preços do gasóleo decrescem, como se verifica para os outros perfis neste caso de estudo, a análise deve ser feita com mais detalhe. Vejamos o que o perfil da curva dos custos de ciclo de vida acumulados, representado na Figura 20, para a situação do preço do gasóleo decrescer 5% e da eletricidade crescer 2,5%.

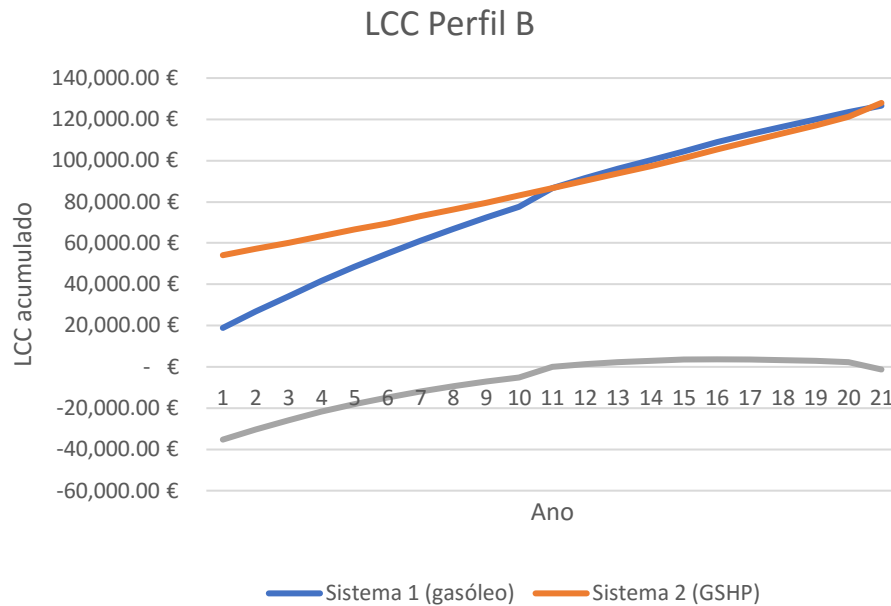


Figura 20 – Evolução dos custos de ciclo de vida acumulados

Nesta situação, os custos de ciclo de vida acumulados cruzam-se em dois momentos, perto do ano 11 e voltam a cruzar-se no ano 20. Dados os fluxos de caixa não convencionais, caso a análise não fosse feita com mais atenção, poderíamos validar erradamente a geotermia para este caso. Os custos de ciclo de vida do sistema geotérmico, nesta situação, no horizonte analisado, seriam superiores em 1%, sendo que este 1% representam 1 334€. Na melhor hipótese calculada (os preços do gasóleo crescerem anualmente 5% acima e da eletricidade decrescerem 5%), os custos de ciclo de vida a geotermia mostram poupanças de 163 440€ (62,53%). O cliente recupera o investimento em 6 anos e o custo nivelado para produzir um kWh com a geotermia custa menos 0,223€ (sem consideração dos valores residuais) que no outro sistema.

Para o perfil de cliente C em 16 dos 25 casos simulados demonstraram poupanças nos custos de ciclo de vida da geotermia face ao sistema a gasóleo. No melhor dos casos simulados, a escolha do sistema geotérmico permitiria uma poupança de 40 536€ face ao sistema 1, durante os 20 anos de estudo.

Neste caso de estudo, que representou uma situação de um sistema avariado, foi possível perceber o impacto que fatores externos, nomeadamente a evolução dos preços das fontes de energia podem ter na tomada de decisão. Na maioria dos casos, o sistema geotérmico mostrou ser o mais atrativo.

Conclusão dos dois casos de estudo analisados

Estes dois casos de estudo demonstram que as vantagens da geotermia não são apenas ambientais, mas que os custos mais baixos resultantes dos altos níveis de eficiência, permitem a recuperação do elevado investimento inicial num curto período de tempo.

É possível ainda uma redução maior nos custos caso se aproveite tarifas mais baixas, o que é praticável com a geotermia. É possível programar a bomba para trabalhar mais nos períodos onde se verifique esta vantagem, uma vez que a energia geotérmica é independente de condições externas, funciona sem intermitências e está disponível continuamente (24h/dia).

Através da disponibilização de incentivos, quer financeiros, quer na criação de impostos sobre as emissões de CO₂ os sistemas geotérmicos tornam-se ainda mais atrativos.

4.4 Ferramenta de cálculo

A ferramenta de cálculo desenvolvida com base nos estudos analisados, permitirá à Tecnilima a realização de estudos financeiros de clientes futuros. A realização deste tipo de estudos, tentará combater a barreira associada ao custo de investimento elevado. Este custo serve como âncora e ofusca a relevância dos custos que ocorrerão no futuro. Com a ferramenta de cálculo desenvolvida será possível apresentar uma estimativa destes custos e indicadores financeiros que permitirão suportar melhor a decisão.

Esta ferramenta foi desenvolvida no *Microsoft Excel* e necessita que o utilizador insira alguns dados. Como dados de entrada, o utilizador terá de calcular e introduzir as necessidades e os diferentes tipos de custos – Figura C.2, C.3 e C.4 do Anexo C. Terá também de introduzir os pressupostos – Figura C.1 do Anexo C. Como resultados figurarão os diferentes critérios financeiros calculados e gráficos que facilitem a compreensão – Figura C.5 do Anexo C. Para orientar o utilizador no preenchimento e uso da ferramenta, esta é acompanhada de instruções.

5 Conclusões e perspetivas de trabalho futuro

Para além das inúmeras vantagens em termos ambientais, a geotermia revelou ser uma das formas mais eficientes de responder às necessidades no setor da construção (climatização e produção de AQS). Como confirmado por estudos desenvolvidos por outros autores, a geotermia demonstrou a sua viabilidade técnica, revelando níveis de eficiência bastante satisfatórios.

Estudos de mercado revelam que há potencial em Portugal, uma vez que há regiões com climas semelhantes com maiores níveis de implementação. A existência da plataforma PPGS também assistirá neste progresso. Através da análise de fatores que influenciam o crescimento dos mercados, a disponibilização de incentivos quer sob a forma de subsídios ou redução da carga fiscal, poderá permitir uma maior tração nesta fase inicial.

O alinhamento com a estratégia europeia e nacional é óbvio, esta tecnologia mostrou ter bastante potencial no alcance das metas propostas. Sendo, por isso, passível de ser alvo de incentivos futuros que permitam uma maior implementação e dinamização do mercado.

Uma das razões realçadas por diversos autores para que a tecnologia não esteja a ter a devida disseminação, é a pouca consciencialização dos decisores finais face à tecnologia e vantagens da mesma. A falta de informação sobre esta solução energética, por parte dos clientes na tomada de decisão e seleção entre as diversas alternativas, leva a que a geotermia nem esteja a ser tida em conta, uma vez que os clientes não percebem como funciona e não pretendem implementar algo que não conhecem. Com o objetivo de facilitar a apresentação e permitir uma melhor introdução da tecnologia aos clientes finais e aos restantes stakeholders, foi criada uma apresentação em *Microsoft PowerPoint*, onde são expostas as diversas vantagens e é explicado funcionamento da tecnologia.

A viabilidade financeira foi demonstrada através da análise dos dois casos de estudo reais verificados em Portugal. Com o estudo financeiro, foi elaborada uma ferramenta de cálculo que permitirá à empresa uma exposição mais clara e transparente dos benefícios financeiros deste tipo de sistemas. A apresentação, junto da análise financeira detalhada do caso do cliente em causa, permitirá à empresa um momento de proximidade com o cliente e possibilitará uma melhor perceção e controlo do processo. Este momento permitirá também perceber quais as suas necessidades e em que fatores se baseiam na tomada de decisão. Isto possibilitará à Tecnilima desenvolver e adaptar melhor a sua proposta de valor.

No futuro, pretende-se perceber a aceitação por parte dos clientes e desenvolver esforços que permitam uma maior presença desta tecnologia nos gabinetes de engenharia e arquitetura, de modo a sensibilizar também outros agentes que influenciam o projeto e construção de habitações. É também essencial o acompanhamento das tendências de mercado e do progresso tecnológico deste tipo de sistemas. Isto permitirá à Tecnilima estar na vanguarda e possivelmente reduzir custos através da otimização dos sistemas.

Referências

- Antics, Miklos, Ruggero Bertani e Burkhard Sanner. 2016. "Summary of EGC 2016 Country Update Reports on Geothermal Energy in Europe ". Comunicação apresentada em European Geothermal Congress 2016, em Strasbourg, France. 19-24 Sept 2016 <http://ubeg.de/Lit/EGC2016 - Keynote K1 - Country Update Reports.pdf>.
- Bayer, Peter, Dominik Saner, Stephan Bolay, Ladislaus Rybach e Philipp Blum. 2012. "Greenhouse gas emission savings of ground source heat pump systems in Europe: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no. 16 (2):1256-1267. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004771>.
- BdP. 2016. "Banco de Portugal divulga Boletim Económico de dezembro de 2016". Acedido a Junho 2017. <https://www.bportugal.pt/comunicado/banco-de-portugal-divulga-boletim-economico-de-dezembro-de-2016>.
- Caleffi. 2009. "As bombas de calor". *Hidráulica* 28, Dezembro 2009.
- . 2011. "Instalações com bombas de calor geotérmicas". *Hidráulica* 30, Outubro 2011.
- Carvalho, Anabela Duarte, Dimitris Mendrinou e Anibal T. De Almeida. 2015. "Ground source heat pump carbon emissions and primary energy reduction potential for heating in buildings in Europe—results of a case study in Portugal". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* no. 45:755-768. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001227>.
- Comissão Europeia. "Estratégia energética para 2030". <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/2030-energy-strategy>.
- . 2015. Europa 2020 - Principais metas da UE para o crescimento económico http://ec.europa.eu/europe2020/pdf/annexii_en.pdf.
- . 2016. An EU Strategy on Heating and Cooling. <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling>.
- . 2017. Proposta de DIRETIVA DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis (reformulação). <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/3eb9ae57-faa6-11e6-8a35-01aa75ed71a1/language-pt/format-PDF>.
- Curtis, R., J. Lund, B. Sanner, L. Rybach e G. Hellström. 2005. "Ground Source Heat Pumps - Geothermal Energy for Anyone, Anywhere: Current Worldwide Activity". Comunicação apresentada em World Geothermal Congress 2005, em Antalya, Turkey. 24-29 April 2005.
- De Almeida, Aníbal T., Ana Lopes, Anabela Carvalho, Jorge Mariano e Catarina Nunes. 2004. "Evaluation of fuel-switching opportunities in the residential sector". *Energy*

- and Buildings* no. 36 (2):195-203. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778803001373>.
- Diaz, Rayco Marrero. 2014. "Situação da geotermia superficial em Portugal, resultados do inquérito análise SWOT". Comunicação apresentada em 2o Seminário da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial – PPGS, em Auditório Carlos Ribeiro LNEG, Campus de Alfragide, Amadora. <http://hdl.handle.net/10400.9/2822>.
- Dimplex. "Técnica explicada: Bomba de calor". Acedido a 19 de maio 2017. <http://www.dimplex.de/pt/profissional/tecnica-explicada/bombas-de-calor/assim-funciona-uma-bomba-de-calor-animacoes.html>
- E.N.M.C. "Entidade Nacional para o Mercado de Combustíveis - Preços de referência dos combustíveis". Acedido a junho 2017. <http://www.enmc.pt/pt-PT>.
- Ecofys. 2013. *Heat Pump Implementation Scenarios until 2030. An analysis of the technology's potential in the building sector of Austria, Belgium, Germany, Spain, France, Italy, Sweden and the United Kingdom*.
- EDP. "Equivalências energéticas com base no poder calorífico inferior (PCI) dos combustíveis". Acedido a junho 2017. <http://www.edpgasdistribuicao.pt/index.php?id=484>.
- EurObserv'ER. 2016. *Heat Pumps Barometer*. <https://www.eurobserv-er.org/heat-pumps-barometer-2016/>.
- Eurostat. Acedido a 11 de maio de 2017. <http://ec.europa.eu/eurostat/>.
- . 2017a. "Energy from renewable sources". Acedido a 11 de maio. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_from_renewable_sources.
- . 2017b. "Greenhouse gas emission statistics". Acedido a junho 2017. http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics.
- . 2017c. In 2016, CO2 emissions in the EU estimated to have slightly decreased compared with 2015. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-press-releases/-/8-04052017-BP>
- . 2017d. Share of renewables in energy consumption in the EU still on the rise to almost 17% in 2015. Em *Eleven Member States already achieved their 2020 targets*. <http://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-press-releases/-/8-14032017-BP>.
- Ferreira, Gabriela. 2014. "Sistemas Geotérmicos. Contributo para a Sustentabilidade". Comunicação apresentada em 14.as Jornadas de Engenharia de Climatização, em Sede da Ordem dos Engenheiros, Lisboa. 16 de outubro de 2014.
- FROnT. 2016. *Results Oriented Final Report (Deliverable 6.10)*. <http://www.front-rhc.eu/front-results-oriented-final-report/>.
- GEOTeCH. 2016. *GEOthermal Technology for economic Cooling and Heating (D7.1 Market assessment)*. http://www.geotech-project.eu/wp-content/uploads/2016/12/D7.1_Market_Assessment.pdf.
- GROUND-MED. "GROUND-MED Project – Advanced ground source heat pump systems for heating and cooling in Mediterranean climate. Supported by the European Commission within the Seventh Framework Programme.". <http://groundmed.eu/>.

- Hughes, Patrick J. 2008. *Geothermal (Ground-Source) Heat Pumps: Market Status, Barriers to Adoption, and Actions to Overcome Barriers*. <http://digitalcommons.unl.edu/usdoepub/15/>.
- IGCP, Agência de Gestão da Tesouraria e da Dívida Pública -. 2017. "Taxa de juro bruta para novas subscrições e capitalizações de Certificados de Aforro". Acedido a Junho 2017. <https://www.igcp.pt/pt/menu-lateral/certificados-de-aforro/taxa-de-juro-anual/>.
- Lopes Maria Dulce, Soares. 2011. *Elaboração e análise de projetos de investimento*. Coleção Manuais. Porto: FEUP Edições.
- Lourenço, Carla e José Cruz. 2006. "Os Recursos Geotérmicos de Baixa Entalpia em Portugal Continental e seu Tipo de Aproveitamento". *Boletim de Minas* no. 41 (2):175-186. <http://hdl.handle.net/10400.9/2154>.
- Madureira, Pedro Ribeiro. 2013. "Apresentação do Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial". Comunicação apresentada em 1o Seminário da Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial LNEG. 08/07/2013.
- Naicker, Selvaraj Soosaiappa. 2015. "Performance Analysis of a Large-Scale Ground Source Heat Pump System", Institute of Energy and Sustainable, Development School of Engineering and Sustainable Development, De Montfort University. <http://hdl.handle.net/2086/12265>.
- Nam, Gyung-mok, Sang-ho Park, Ju-Young Kim e Won-Hwa Hong. 2010. "Research on Economic Evaluation of Ground Source Heat Pump System in a School Building". Comunicação apresentada em International Conference on Sustainable Building Asia SB10 Seoul.
- Ramalho, E. C., P. Madureira, C. Lourenço, A. Francés, A. Joyce, L. D. Silva e L. Silva. 2014. "A Plataforma Portuguesa de Geotermia Superficial e o seu papel na dinamização do mercado da geotermia em Portugal". Comunicação apresentada em 2º Congresso de Geologia dos Países de Língua Portuguesa, em Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. <http://www.lneg.pt/iedt/unidades/16/paginas/26/30/185>.
- Rees, S. J. 2016. "1 - An introduction to ground-source heat pump technology". Em *Advances in Ground-Source Heat Pump Systems*, 1-25. Woodhead Publishing. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081003114000017>.
- Ruqun, Wu. 2009. "Energy Efficiency Technologies – Air Source Heat Pump vs. Ground Source Heat Pump". *Journal of Sustainable Development* no. 2:10. <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/2986/2757>.
- Self, Stuart J., Bale V. Reddy e Marc A. Rosen. 2013. "Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options". *Applied Energy* no. 101:341-348. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261912000542>.
- Sørensen, Bent. 2011. "Chapter 7 - Socioeconomic Assessment". Em *Renewable Energy (Fourth Edition)*, 783-880. Boston: Academic Press. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123750259000075>.
- Swenka, Matthew James. 2008. "An energy and cost analysis of residential ground-source heat pumps in Iowa". Thesis, Mechanical Engineering, Iowa State University. <http://lib.dr.iastate.edu/rtd/15437/>.

ANEXO A: Apresentação desenvolvida



Figura A. 1 – Slide 1



Figura A. 2 – Slide 2

COMPONENTES DE UM SISTEMA GEOTÉRMICO

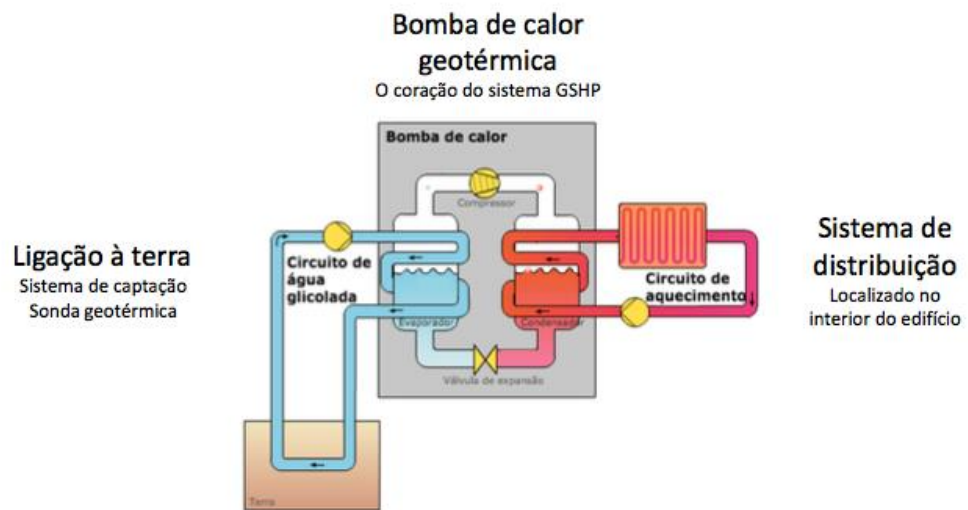


Figura A. 3 – Slide 3

QUE CONFIGURAÇÕES HÁ?

CIRCUITO ABERTO



CIRCUITO FECHADO

Horizontal e vertical

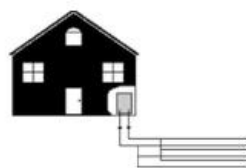


Figura A. 4 – Slide 4

「QUE TIPOS
DE SISTEMA
DISTRIBUIÇÃO HÁ?」



Figura A. 5 – Slide 5

「MODOS DE FUNCIONAMENTO」

Aquecimento AQS + AQS

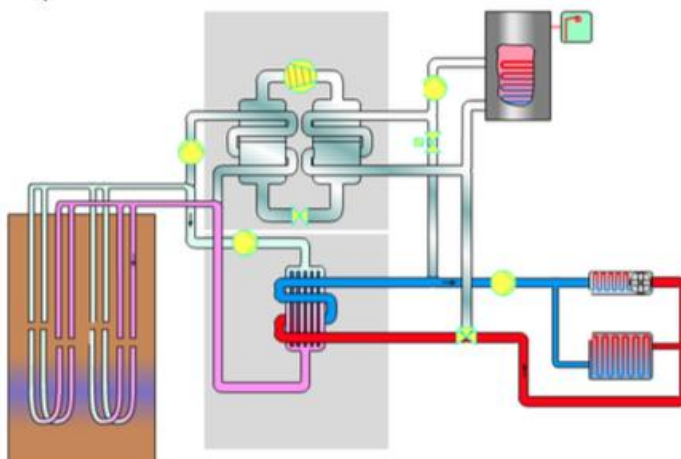


Figura A. 6 – Slide 6

VANTAGENS

- › **Energia renovável e ecológica** devido à reduzida emissão de gases para a atmosfera;
- › **Eficiente**, permitindo **poupanças significativas** resultantes dos altos níveis de performance conseguidos. **Custos operativos mais baixos** e menos necessidades de manutenção;
- › **Versátil**, apresenta vantagens relativamente a outros sistemas de climatização renováveis, uma vez que é um dos poucos que permite obter aquecimento, arrefecimento e produção de AQS com a mesma instalação;
- › **Independente de condições externas**, funciona sem intermitências ao contrário de outras fontes de energia renovável, como a solar e a eólica. É por isso encarada como forma de energia contínua, disponível 24h/dia;

Figura A. 7 – Slide 7

VANTAGENS

- › **Energia local, sem preocupações com o reabastecimento** como acontece com algumas soluções;
- › Amiga do ambiente e **Independente da volatilidade e Incerteza dos preços dos combustíveis fósseis**;
- › **Longa vida útil**, comprovada pelo elevado número de instalações existentes em alguns países;
- › **Impacto paisagístico reduzido** ao contrário de outros sistemas com instalações exteriores, o sistema de captação encontra-se no subsolo e a bomba de calor acondicionada num espaço reduzido dentro da habitação. Não necessita de chaminé, uma vez que não se geram chamas nem fumos;
- › **Inexistência de ruídos**, como os característicos de outras soluções com ventiladores.

Figura A. 8 – Slide 8

「DESVANTAGENS」

- › **Investimento Inicial** (que não inviabiliza necessariamente o sistema)

Figura A. 9 – Slide 9

「ANÁLISE FINANCEIRA」

(Análise financeira do cliente em causa

Poupanças

Apresentação dos critérios financeiros e gráficos

Conclusões)

Figura A. 10 – Slide 10

ANEXO B: Resultados da análise de sensibilidade

Tabela B. 1 - Análise sensibilidade Caso de estudo 1 Perfil A

Perfil A - Caso de estudo 1		Preço gasóleo		Taxa de crescimento/decréscimo anual		Preço electricidade	
		Taxa de crescimento/decréscimo anual		Preço gasóleo		Taxa de crescimento/decréscimo anual	
		(-5%)	(+5%)	(-2.5%)	(+2.5%)	(-2.5%)	(+5%)
(-5%)	LCC1	57 041,72 €	58 340,37 €	LCC1	60 070,44 €	LCC1	62 175,04 €
	LCC2	54 016,66 €	54 016,66 €	LCC2	54 016,66 €	LCC2	54 016,66 €
	Δ	3 025,06 €	4 324,30 €	Δ	5 993,78 €	Δ	8 158,38 €
	LCoHC 1	0,13324 €/kWh	0,13676 €/kWh	LCoHC 1	0,16126 €/kWh	LCoHC 1	0,17466 €/kWh
	Δ	0,13324 €/kWh	0,13676 €/kWh	Δ	0,16126 €/kWh	Δ	0,17466 €/kWh
	LCoHC 2	0,13324 €/kWh	0,13676 €/kWh	LCoHC 2	0,13324 €/kWh	LCoHC 2	0,13324 €/kWh
	Δ	0,00244 €/kWh	0,00244 €/kWh	Δ	-0,00554 €/kWh	Δ	-0,01134 €/kWh
	TIR (custos diferenciais)	0,108308218	0,120010937	TIR (custos diferenciais)	0,133009747	TIR (custos diferenciais)	0,147515559
	PRA	13 anos	11 anos	PRA	11 anos	PRA	9 anos
	TIR (custos diferenciais)	0,108308218	0,120010937	TIR (custos diferenciais)	0,133009747	TIR (custos diferenciais)	0,147515559
(-2.5%)	LCC1	58 862,29 €	60 161,83 €	LCC1	61 831,30 €	LCC1	63 995,50 €
	LCC2	54 840,66 €	54 840,66 €	LCC2	54 840,66 €	LCC2	54 840,66 €
	Δ	4 021,93 €	5 321,17 €	Δ	6 990,65 €	Δ	9 155,25 €
	LCoHC 1	0,13814 €/kWh	0,16164 €/kWh	LCoHC 1	0,16614 €/kWh	LCoHC 1	0,17954 €/kWh
	Δ	0,13814 €/kWh	0,16164 €/kWh	Δ	0,16614 €/kWh	Δ	0,17954 €/kWh
	LCoHC 2	0,13814 €/kWh	0,13814 €/kWh	LCoHC 2	0,13814 €/kWh	LCoHC 2	0,13814 €/kWh
	Δ	-0,00114 €/kWh	-0,00364 €/kWh	Δ	-0,00814 €/kWh	Δ	-0,01394 €/kWh
	TIR (custos diferenciais)	0,117359324	0,128308187	TIR (custos diferenciais)	0,140324566	TIR (custos diferenciais)	0,153724285
	PRA	12 anos	11 anos	PRA	10 anos	PRA	9 anos
	TIR (custos diferenciais)	0,117359324	0,128308187	TIR (custos diferenciais)	0,140324566	TIR (custos diferenciais)	0,153724285
=	LCC1	61 202,32 €	62 501,56 €	LCC1	64 171,04 €	LCC1	66 335,64 €
	LCC2	55 859,45 €	55 859,45 €	LCC2	55 859,45 €	LCC2	55 859,45 €
	Δ	5 302,87 €	6 602,11 €	Δ	8 271,58 €	Δ	10 436,38 €
	LCoHC 1	0,16444 €/kWh	0,16794 €/kWh	LCoHC 1	0,17234 €/kWh	LCoHC 1	0,17834 €/kWh
	Δ	0,16444 €/kWh	0,16794 €/kWh	Δ	0,17234 €/kWh	Δ	0,17834 €/kWh
	LCoHC 2	0,16114 €/kWh	0,16114 €/kWh	LCoHC 2	0,16114 €/kWh	LCoHC 2	0,16114 €/kWh
	Δ	-0,00334 €/kWh	-0,00684 €/kWh	Δ	-0,01134 €/kWh	Δ	-0,01714 €/kWh
	TIR (custos diferenciais)	0,127757258	0,137625087	TIR (custos diferenciais)	0,148789025	TIR (custos diferenciais)	0,161255408
	PRA	11 anos	10 anos	PRA	10 anos	PRA	9 anos
	TIR (custos diferenciais)	0,127757258	0,137625087	TIR (custos diferenciais)	0,148789025	TIR (custos diferenciais)	0,161255408
(+2.5%)	LCC1	64 235,56 €	65 535,20 €	LCC1	67 204,68 €	LCC1	69 369,28 €
	LCC2	57 272,27 €	57 272,27 €	LCC2	57 272,27 €	LCC2	57 272,27 €
	Δ	6 963,70 €	8 262,94 €	Δ	9 932,41 €	Δ	12 097,01 €
	LCoHC 1	0,17234 €/kWh	0,17644 €/kWh	LCoHC 1	0,18034 €/kWh	LCoHC 1	0,18634 €/kWh
	Δ	0,17234 €/kWh	0,17644 €/kWh	Δ	0,18034 €/kWh	Δ	0,18634 €/kWh
	LCoHC 2	0,16544 €/kWh	0,16544 €/kWh	LCoHC 2	0,16544 €/kWh	LCoHC 2	0,16544 €/kWh
	Δ	-0,00754 €/kWh	-0,01114 €/kWh	Δ	-0,01554 €/kWh	Δ	-0,02134 €/kWh
	TIR (custos diferenciais)	0,138400124	0,148312097	TIR (custos diferenciais)	0,158480545	TIR (custos diferenciais)	0,169448717
	PRA	10 anos	10 anos	PRA	9 anos	PRA	8 anos
	TIR (custos diferenciais)	0,138400124	0,148312097	TIR (custos diferenciais)	0,158480545	TIR (custos diferenciais)	0,169448717
(+5%)	LCC1	68 200,25 €	69 499,50 €	LCC1	71 168,97 €	LCC1	73 333,57 €
	LCC2	59 066,23 €	59 066,23 €	LCC2	59 066,23 €	LCC2	59 066,23 €
	Δ	9 134,03 €	10 433,27 €	Δ	12 102,75 €	Δ	14 267,35 €
	LCoHC 1	0,18324 €/kWh	0,18674 €/kWh	LCoHC 1	0,19114 €/kWh	LCoHC 1	0,19714 €/kWh
	Δ	0,18324 €/kWh	0,18674 €/kWh	Δ	0,19114 €/kWh	Δ	0,19714 €/kWh
	LCoHC 2	0,17024 €/kWh	0,17024 €/kWh	LCoHC 2	0,17024 €/kWh	LCoHC 2	0,17024 €/kWh
	Δ	-0,01364 €/kWh	-0,01654 €/kWh	Δ	-0,03164 €/kWh	Δ	-0,03444 €/kWh
	TIR (custos diferenciais)	0,152304123	0,160276557	TIR (custos diferenciais)	0,169439554	TIR (custos diferenciais)	0,179863011
	PRA	10 anos	9 anos	PRA	9 anos	PRA	8 anos
	TIR (custos diferenciais)	0,152304123	0,160276557	TIR (custos diferenciais)	0,169439554	TIR (custos diferenciais)	0,179863011

Tabela B. 2 - Análise sensibilidade Caso de estudo 1 Perfil B

Perfil B - Caso de estudo 1		Preço gásóleo									
	Preço electricidade	taxa de crescimento/decrecimento anual									
		taxa de crescimento/decrecimento anual									
		=									
(-5%)	(-5%)	[-5%]		[-2.5%]		[+2.5%]		[+5%]		[+5%]	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		77 215,56 €	63 933,08 €	80 083,09 €	63 933,08 €	83 914,73 €	63 933,08 €	89 068,78 €	63 933,08 €	96 037,78 €	63 933,08 €
		Δ	13 282,49 €	Δ	16 150,01 €	Δ	19 381,65 €	Δ	25 135,70 €	Δ	32 104,70 €
		LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh
(0%)	(0%)	[0%]		[0%]		[0%]		[0%]		[0%]	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		77 215,56 €	63 933,08 €	77 215,56 €	63 933,08 €	77 215,56 €	63 933,08 €	77 215,56 €	63 933,08 €	77 215,56 €	63 933,08 €
		Δ	0 €	Δ	0 €	Δ	0 €	Δ	0 €	Δ	0 €
		LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh
(+5%)	(+5%)	[+5%]		[+2.5%]		[-2.5%]		[-5%]		[-5%]	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		83 914,73 €	63 933,08 €	80 083,09 €	63 933,08 €	77 215,56 €	63 933,08 €	73 300,89 €	63 933,08 €	69 005,89 €	63 933,08 €
		Δ	6 701,17 €	Δ	6 150,01 €	Δ	3 262,49 €	Δ	-3 632,19 €	Δ	-4 927,19 €
		LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh	LCoHC 1	0,1143€/kWh

Tabela B. 3 - Análise sensibilidade Caso de estudo 1 Perfil C

Perfil C - Caso de estudo 1		Preço gásóleo									
Preço electricidade	taxa de crescimento/decremento anual	taxa de crescimento/decremento anual									
		Preço gásóleo									
		=									
(-5%)	(-5%)	(-5%)		(2,5%)		(2,5%)		(+2,5%)		(+2,5%)	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		52 706,08 €	52 066,60 €	53 699,36 €	52 066,60 €	54 956,67 €	52 066,60 €	56 963,44 €	52 066,60 €	58 634,37 €	52 066,60 €
		Δ	639,47 €	Δ	1 632,75 €	Δ	2 890,07 €	Δ	4 896,83 €	Δ	6 567,77 €
		LCoHC 1	0,1709€/kWh	LCoHC 1	0,1742€/kWh	LCoHC 1	0,1782€/kWh	LCoHC 1	0,1835€/kWh	LCoHC 1	0,1902€/kWh
(-2,5%)	(-2,5%)	(-2,5%)		(2,5%)		(2,5%)		(+2,5%)		(+2,5%)	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		54 098,14 €	52 696,55 €	55 091,41 €	52 696,55 €	56 348,73 €	52 696,55 €	57 953,50 €	52 696,55 €	60 026,43 €	52 696,55 €
		Δ	1 401,58 €	Δ	2 394,86 €	Δ	3 652,18 €	Δ	5 258,94 €	Δ	7 329,88 €
		LCoHC 1	0,1753€/kWh	LCoHC 1	0,1787€/kWh	LCoHC 1	0,1829€/kWh	LCoHC 1	0,1886€/kWh	LCoHC 1	0,1947€/kWh
=	=	=		(2,5%)		(2,5%)		(+2,5%)		(+2,5%)	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		55 860,24 €	53 493,96 €	56 853,52 €	53 493,96 €	58 110,84 €	53 493,96 €	59 717,60 €	53 493,96 €	61 788,54 €	53 493,96 €
		Δ	2 366,29 €	Δ	3 359,56 €	Δ	4 616,88 €	Δ	6 223,65 €	Δ	8 294,58 €
		LCoHC 1	0,1812€/kWh	LCoHC 1	0,1844€/kWh	LCoHC 1	0,1885€/kWh	LCoHC 1	0,1937€/kWh	LCoHC 1	0,2004€/kWh
(+2,5%)	(+2,5%)	(+2,5%)		(2,5%)		(2,5%)		(+2,5%)		(+2,5%)	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		58 112,09 €	54 512,98 €	59 105,37 €	54 512,98 €	60 362,69 €	54 512,98 €	61 969,45 €	54 512,98 €	64 040,38 €	54 512,98 €
		Δ	3 599,11 €	Δ	4 592,38 €	Δ	5 849,70 €	Δ	7 456,47 €	Δ	9 537,40 €
		LCoHC 1	0,1885€/kWh	LCoHC 1	0,1917€/kWh	LCoHC 1	0,1958€/kWh	LCoHC 1	0,201€/kWh	LCoHC 1	0,2077€/kWh
(+5%)	(+5%)	(+5%)		(2,5%)		(2,5%)		(+2,5%)		(+2,5%)	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		61 014,46 €	55 826,39 €	62 007,74 €	55 826,39 €	63 265,06 €	55 826,39 €	64 871,82 €	55 826,39 €	66 942,76 €	55 826,39 €
		Δ	5 188,07 €	Δ	6 181,35 €	Δ	7 438,67 €	Δ	9 045,43 €	Δ	11 116,37 €
		LCoHC 1	0,1979€/kWh	LCoHC 1	0,2011€/kWh	LCoHC 1	0,2052€/kWh	LCoHC 1	0,2104€/kWh	LCoHC 1	0,2171€/kWh
(+10%)	(+10%)	(+10%)		(2,5%)		(2,5%)		(+2,5%)		(+2,5%)	
		LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2	LCC1	LCC2
		65 184,46 €	59 996,39 €	66 177,74 €	59 996,39 €	67 435,46 €	59 996,39 €	69 041,22 €	59 996,39 €	71 112,16 €	59 996,39 €
		Δ	4 170,00 €	Δ	5 163,28 €	Δ	6 420,59 €	Δ	8 027,35 €	Δ	10 098,29 €
		LCoHC 1	0,2073€/kWh	LCoHC 1	0,2105€/kWh	LCoHC 1	0,2146€/kWh	LCoHC 1	0,2208€/kWh	LCoHC 1	0,2275€/kWh

Tabela B. 4 - Análise sensibilidade Caso de estudo 2 Perfil A

[illegible]

Tabela B. 5 - Análise sensibilidade Caso de estudo 2 Perfil B

Perfil B - Caso de estudio 2									
Precio gasóleo									
tasa de crecimiento/decremento anual =									
	(-5%)	(-2,5%)	(+2,5%)	(+5%)					
(-5%)	LCC1	126 618,02 €	147 122,73 €	174 521,55 €	LCC1	211 376,47 €	LCC1	261 209,47 €	
	LCC2	97 869,55 €	Δ	Δ	LCC2	97 869,55 €	LCC2	127 952,45 €	
	Δ	28 748,47 €	-22,70%	Δ	Δ	113 506,92 €	Δ	163 339,92 €	-62,53%
	LCoHC1	0,1799€/kWh	Δ	Δ	LCoHC1	0,3004€/kWh	LCoHC1	0,3712€/kWh	
	LCoHC2	0,1482€/kWh	Δ	Δ	LCoHC2	0,1482€/kWh	LCoHC2	0,1482€/kWh	
	Δ	-0,0317€/kWh	-17,62%	Δ	-0,1521€/kWh	-50,65%	Δ	-0,223€/kWh	-60,07%
	TIR (costos diferenciales)	0,09077569%	0,12238401%	0,15216912%	TIR (costos diferenciales)	0,18079241%	TIR (costos diferenciales)	0,20861526%	
PRA	9 años	PRA	7 años	PRA	6 años	PRA	5 años		
(-2,5%)	LCC1	126 618,02 €	147 122,73 €	174 521,55 €	LCC1	211 376,47 €	LCC1	261 209,47 €	
	LCC2	105 147,19 €	Δ	Δ	LCC2	105 147,19 €	LCC2	105 147,19 €	
	Δ	21 470,83 €	-16,96%	Δ	69 374,36 €	-39,75%	Δ	156 062,38 €	-59,75%
	LCoHC1	0,1799€/kWh	Δ	Δ	LCoHC1	0,3004€/kWh	LCoHC1	0,3712€/kWh	
	LCoHC2	0,1592€/kWh	Δ	Δ	LCoHC2	0,1592€/kWh	LCoHC2	0,1592€/kWh	
	Δ	-0,0307€/kWh	-11,50%	Δ	-0,1411€/kWh	-46,98%	Δ	-0,2119€/kWh	-57,10%
	TIR (costos diferenciales)	0,07659882%	0,11220552%	0,14438602%	TIR (costos diferenciales)	0,17459737%	TIR (costos diferenciales)	0,20354267%	
PRA	10 años	PRA	7 años	PRA	6 años	PRA	5 años		
(+2,5%)	LCC1	126 618,02 €	147 122,73 €	174 521,55 €	LCC1	211 376,47 €	LCC1	261 209,47 €	
	LCC2	114 871,71 €	Δ	Δ	LCC2	114 871,71 €	LCC2	114 871,71 €	
	Δ	11 746,30 €	-9,28%	Δ	59 649,83 €	-34,18%	Δ	146 337,76 €	-56,02%
	LCoHC1	0,1799€/kWh	Δ	Δ	LCoHC1	0,3004€/kWh	LCoHC1	0,3712€/kWh	
	LCoHC2	0,174€/kWh	Δ	Δ	LCoHC2	0,174€/kWh	LCoHC2	0,174€/kWh	
	Δ	-0,006€/kWh	-3,31%	Δ	-0,1264€/kWh	-42,08%	Δ	-0,1972€/kWh	-53,13%
	TIR (costos diferenciales)	0,05377201%	0,09775160%	0,13403120%	TIR (costos diferenciales)	0,16669224%	TIR (costos diferenciales)	0,19725893%	
PRA	10 años	PRA	7 años	PRA	7 años	PRA	7 años		
(+5%)	LCC1	126 618,02 €	147 122,73 €	174 521,55 €	LCC1	211 376,47 €	LCC1	261 209,47 €	
	LCC2	127 952,45 €	Δ	Δ	LCC2	127 952,45 €	LCC2	127 952,45 €	
	Δ	1 334,43 €	1,05%	Δ	83 424,07 €	-39,47%	Δ	133 257,02 €	-51,07%
	LCoHC1	0,1799€/kWh	Δ	Δ	LCoHC1	0,3004€/kWh	LCoHC1	0,3712€/kWh	
	LCoHC2	0,1938€/kWh	Δ	Δ	LCoHC2	0,1938€/kWh	LCoHC2	0,1938€/kWh	
	Δ	0,0139€/kWh	7,70%	Δ	-0,1066€/kWh	-35,49%	Δ	-0,1774€/kWh	-47,79%
	TIR (costos diferenciales)	-	0,07455210%	0,11953124%	TIR (costos diferenciales)	0,15619796%	TIR (costos diferenciales)	0,18974664%	
PRA	-	PRA	7 años	PRA	7 años	PRA	7 años		
(+5%)	LCC1	126 618,02 €	147 122,73 €	174 521,55 €	LCC1	211 376,47 €	LCC1	261 209,47 €	
	LCC2	145 639,43 €	Δ	Δ	LCC2	145 639,43 €	LCC2	145 639,43 €	
	Δ	19 021,41 €	15,02%	Δ	65 377,04 €	-31,10%	Δ	115 570,04 €	-44,24%
	LCoHC1	0,1799€/kWh	Δ	Δ	LCoHC1	0,3004€/kWh	LCoHC1	0,3712€/kWh	
	LCoHC2	0,2206€/kWh	Δ	Δ	LCoHC2	0,2206€/kWh	LCoHC2	0,2206€/kWh	
	Δ	0,0406€/kWh	22,59%	Δ	-0,0798€/kWh	-26,57%	Δ	-0,1506€/kWh	-40,58%
	TIR (costos diferenciales)	-	0,01768013%	0,095887917%	TIR (costos diferenciales)	0,14132880%	TIR (costos diferenciales)	0,17861617%	
PRA	-	PRA	8 años	PRA	8 años	PRA	7 años		

Tabela B. 6 - Análise sensibilidade Caso de estudo 2 Perfil C

Perfil C - Caso de estudo 2												
Preço gasóleo												
Preço gás natural												
Preço eletricidade												
	(-5%)			(-2,5%)			Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo			Preço gás natural		
							Preço gasóleo</					

ANEXO C: Ferramenta de cálculo

Pressupostos				
Taxa de inflação			1,50%	
Taxa de atualização real			7%	
Horizonte de análise			20 anos	
Crescimento do custo das m			1,50%	
taxa de crescimento preço g			1	
taxa de crescimento preço e			1	

Fonte	Preço unidade (c/IVA)	PCI (kWh/L)	Preço kWh	
Gasóleo Aquecimento	Preço p/ Litro	1,065	10,0230814	0,106254749
Eletricidade (F. Vazio)	Preço kwh	0,1997	-	0,1997

Figura C. 1 - Dados de entrada: Pressupostos

	Consumos (em kWh)	
	Gasóleo	Electricidade
Sistema 1	9618,423913	7172,342323
Sistema 2		3245,695455
Δ	-9618,423913	-3926,646868

Figura C. 2 - Dados de entrada: Consumos energéticos por fonte de combustível

Necessidade		Custos de investimento	
		Sistema 1	Sistema 2
Climatização	Aquecimento	Caldeira de condensação (gasóleo) Piso radiante quente	Bomba de calor geotérmica + KITs Furos Sonda geotérmica Piso radiante quente e frio
	Arrefecimento	Ar condicionado	
AQS		Bomba de calor + coletor solar	
Piscina		Bomba de calor	
Total s/ IVA		24 697,00 €	35 228,00 €
Total c/ IVA (23%)		30 377,31 €	43 330,44 €

Figura C. 3 - Dados de entrada: Custos de investimento

Necessidade		Sistema 1				Sistema 2			
		Necessidade anual kWh	Custos anuais (ano 1)		Custos periódicos		Necessidade anual kWh	Custos anuais (ano 1)	
			Custos manutenção	Custos operacionais	Custo	Ano		Custos manutenção	Custos operacionais
Climatização	Aquecimento	8848,95	114,39 €	1 022,00 €	4 200,00 €	15	8848,95	430,50 €	321,30 €
	Arrefecimento	16058	159,90 €	1 029,82 €			13600		98,76 €
AQS		4569	265,68 €	66,00 €			4569		228,11 €
Piscina		6740	79,95 €	336,48 €			6740		- €
			619,92 €	2 454,32 €				430,50 €	648,17 €

Figura C. 4 - Dados de entrada: Necessidades e Custos (anuais e periódicos)

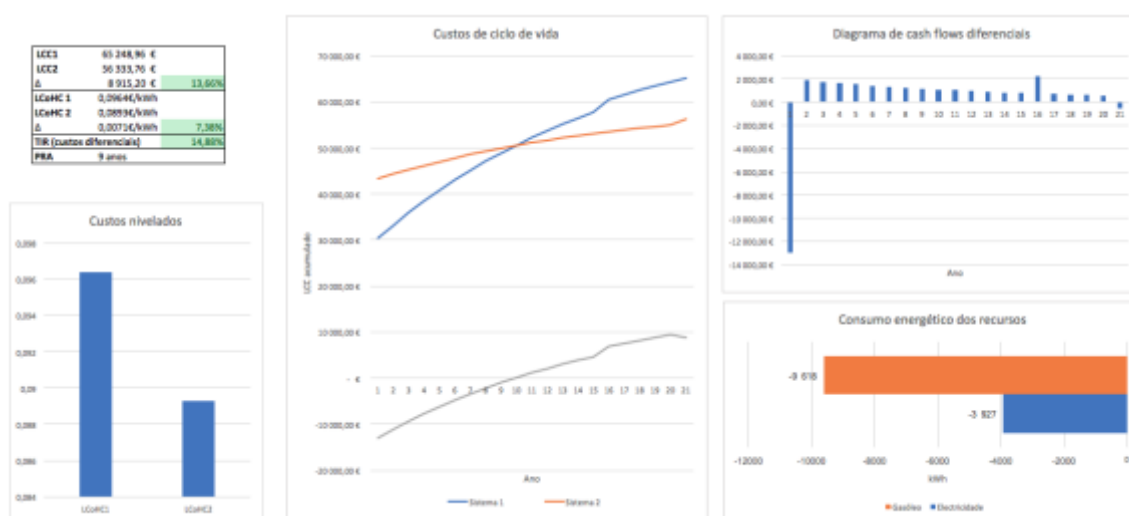


Figura C. 5 - Resultados financeiros